

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

DÉVELOPPEMENT DE NOUVELLES RECTENNAS POUR LA
RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE RF AMBIANTE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ COMME EXIGENCE PARTIELLE DE
MAITRISE EN TÉLÉCOMMUNICATIONS

PAR

Mohammed Cherif Derbal

Juin 2019



Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

Remerciements

D'abord, je tiens à remercier ALLAH le tout puissant qui m'a permis d'achever ce travail et de le présenter sous la forme de ce mémoire.

Ce travail a été réalisé au sein de l'UQAT. Il a été dirigé par Monsieur Mourad Nedil, Professeur à L'UQAT. Je le remercie pour m'avoir fait bénéficier de ses grandes connaissances scientifiques ainsi que pour le temps, la patience qu'il m'a accordée et les précieux conseils qu'il m'a généreusement prodigués. Il m'a laissé une grande liberté dans le choix et l'orientation de mes travaux tout en sachant me guider. Je tiens à souligner la qualité de ses observations pertinentes, sa grande rigueur scientifique et son investissement dans cette étude.

Je voudrais aussi remercier tous les enseignants de Laboratoire LRTCS.

Un grand merci pour toutes les personnes qui m'ont aidé, soutenus et encouragé pendant la réalisation de mon projet de recherche.

Je pense bien sûr à mes parents, à mes familles, à mes amis et à mes camarades de promotion.

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué d'une manière ou d'une autre à l'aboutissement de ce mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
RÉSUMÉ	X
ABSTRACT.....	XI
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1	7
ETAT DE L'ART SUR LA RECUPERATION D'ENERGIE DES ONDES ELECTROMAGNETIQUE.....	7
1.1 Introduction :.....	7
1.2 Les systèmes de récupération d'énergie radio fréquence :.....	8
1.2.1 Vue d'ensemble d'un récupérateur d'énergie RF	8
1.2.2 L'architecture de base d'une Rectenna.	9
1.3 Vue d'ensemble de la conception d'une Rectenna :	10
1.3.3 Densité de puissance radio fréquence disponible.....	10
1.3.4 Différentes architectures du redresseur.	13
1.3.5 Exemple de fonctionnement d'un redresseur série :	17
1.3.6 Efficacité de conversion d'une Rectenna :	19
1.3.7 Le réseau d'adaptation d'impédances	21
1.4 Revue de littérature sur les rectennas utilisées dans les applications de récupération de l'énergie	26
1.5 Conclusion	42
CHAPITRE 2	43
RECTENNA MONO-BANDE AVEC UN RESEAU HEXAGONALE POUR LA RECUPERATION D'ENERGIE	43
2.1 Introduction :.....	43
2.2 Conception de l'antenne	44
2.2.1 Principe de fonctionnement d'une antenne patch avec une alimentation par couplage EM.	44
2.2.2 Etat de l'art :	45

2.2.3 L'antenne proposée :	47
2.2.4 Interprétation des résultats	49
2.2.5 Structure antenne + FSS.....	52
2.3 Conception d'un redresseur mono-bande pour la récupération d'énergie :	56
2.3.6 Architecture globale du redresseur :	56
2.3.7 Méthode de conception du réseau d'adaptation d'impédance.	57
2.3.8 L'architecture proposée :	59
2.3.9 Résultats et discussion :	60
2.4 Conception et réalisation d'un réseau Rectenna hexagonale :	68
2.4.10 Etat de l'art :	68
2.4.11 Conception d'un réseau rectenna hexagonale.	71
2.5 Conclusion :	77
CHAPITRE 3	79
RECTENNA A DOUBLE BANDES POUR LA RECUPERATION D'ENERGIE.....	79
3.1 Introduction :	79
3.2 Conception d'une antenne à double bandes	79
3.2.1 Interprétation des résultats :	84
3.3 Amélioration du gain de l'antenne en utilisant l'algorithme génétique.	86
3.3.2 Interprétation des résultats :	88
3.4 Redresseur à double bandes	91
3.4.3 Architecture globale d'un redresseur à double bandes :	91
3.4.4 Conception d'un redresseur à double bandes :	93
3.4.5 Résultats et discussion :	95
3.5 Conclusion	97
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	99
RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE	101

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Architecture globale de la récupération d'énergie [4].	9
Figure 1.2: Architecture de base d'une Rectenna [4].	10
Figure 1.3: Densité de puissance RF mesurée à la station de métro Northfields London [5].	11
Figure 1.4: Puissance RF mesurée à l'intérieur d'un bâtiment ICL. [5]	12
Figure 1.5: Echelle du besoin en puissance pour des appareils électroniques et	13
Figure 1.6: Différentes architectures des redresseurs : a) série, b) parallèle, c) doubleur de tension, d) pont de Greatz, e) Greinacher [4].	14
Figure 1.7: Tension de sortie en fonction de la puissance incidente pour les	15
Figure 1.8 : Tension de sortie en fonction de la puissance incidente pour les	16
Figure 1.9: Exemple d'un redresseur série.	17
Figure 1.10 : La forme d'onde du signal incident et du signal de sortie en fonction du temps.	18
Figure 1.11 : Redresseur demi-onde à une diode.	18
Figure 1.12 : Tension de sortie pour le redresseur à une diode avec et sans lissage.	19
Figure 1.13 : Schéma d'un récupérateur d'énergie RF [4].	21
Figure 1.14 : Charge alimentée par un générateur.	21
Figure 1.15 : Circuit équivalent de la Rectenna [4].	22
Figure 1.16 : Réseaux d'adaptation.	24
Figure 1.17: Zones des charges pouvant être adaptées.	25
Figure 1.18 : Rectenna proposée pour les applications RFID [8].	27
Figure 1.19 : Structure de la Rectenna proposée dans [9].	27
Figure 1.20 : Rectenna proposée dans [10].	28
Figure 1.21 : Rectenne micro-ruban différentielle [11].	29
Figure 1.22 : Bande de travail de l'antenne proposée dans [12].	30
Figure 1.23: L'antenne et le filtre proposée [12].	30
Figure 1.24: L'antenne et son circuit de redressement [13].	31
Figure 1.25: Rectenna-FSS [14].	32
Figure 1.26: Les pertes de retour de la Rectenna [14].	32
Figure 1.27: Efficacité de conversion en fonction de la densité de puissance [14].	33
Figure 1.28: L'antenne alimentée en L [3].	34
Figure 1.29: Rectificateur à trois bandes [3].	34
Figure 1.30: Efficacité en fonction de la densité de puissance [3].	35
Figure 1.31: Structure finale de l'antenne optimisée [15].	36
Figure 1.32: L'antenne optimisée [15].	36
Figure 1.33: Structure du Redresseur [15].	37
Figure 1.34: Le coefficient de réflexion S11 du redresseur [15].	37
Figure 1.35: L'efficacité RF-DC mesurée du redresseur [15].	38
Figure 1.36: Combineur DC [15].	38
Figure 1.37: FSS proposée dans [16].	39

Figure 1. 38: Caractéristiques d'absorption du FSS [16].	40
Figure 1. 39: Rectificateur à pont de diode [16].	41
Figure 1. 40: Efficacité de redressement en fonction de la fréquence [16].	41
Figure 2. 1 : Structure de base d'une antenne avec une ouverture de couplage [17].	44
Figure 2. 2 : Antenne patch avec alimentation par couplage [18].	46
Figure 2. 3: Coefficient de réflexion de l'antenne [18].	46
Figure 2. 4: Structure de l'antenne proposée dans [19].	47
Figure 2. 5: Coefficient de réflexion de l'antenne [19].	47
Figure 2. 6: L'antenne proposée.	48
Figure 2. 7 : Vue de dessus de l'antenne proposé.	48
Figure 2. 8: Coefficient de réflexion de l'antenne conçue.	49
Figure 2. 9: Diagramme de rayonnement en plan E.	50
Figure 2. 10: Diagramme de rayonnement en plan H.	50
Figure 2. 11: Diagramme de rayonnement en 3D.	51
Figure 2. 12: Photo de l'antenne réalisée.	51
Figure 2. 13: Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne	52
Figure 2. 14: Structure du FSS.	53
Figure 2. 15: Structure de l'antenne avec FSS.	53
Figure 2. 16: Coefficient de réflexion de l'antenne proposée avec FSS.	54
Figure 2. 17: Diagramme de rayonnement dans le plan E de l'antenne avec FSS.	55
Figure 2. 18: Diagramme de rayonnement en plan H de l'antenne avec FSS.	55
Figure 2. 19: Architecture globale utilisée pour construire le redresseur [4].	57
Figure 2. 20: Récupérateur d'énergie RF modélisé [4].	58
Figure 2. 21: Adaptation d'impédance avec le filtre en L.	59
Figure 2. 22: Architecture du redresseur conçu.	60
Figure 2. 23: Coefficient de réflexion du redresseur.	61
Figure 2. 24: Spectres simulés des signaux en entrée et en sortie.	62
Figure 2. 25: L'efficacité de conversion RF-DC du redresseur en fonction de la puissance d'entrée.	62
Figure 2. 26: Tension de sortie du redresseur en fonction de la puissance d'entrée.	63
Figure 2. 27: Résultats de Simulation du coefficient de réflexion du redresseur en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la puissance incidente.	64
Figure 2. 28: Efficacité de conversion du redresseur en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la puissance incidente.	65
Figure 2. 29: Efficacité de conversion du redresseur en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la puissance incidente.	66
Figure 2. 30: Efficacité de conversion en fonction de la charge	67
Figure 2. 31: Tension de sortie en fonction de la charge	67
Figure 2. 32 : Le réseaux d'antennes optimisé [21].	69

Figure 2. 33 : Coefficient de réflexion du réseau d'antenne [21].	69
Figure 2. 34 : La conception de FSS [26].	70
Figure 2. 35 : Bande de travail de FSS [26].	71
Figure 2. 36: Réseau de FSS [26].	71
Figure 2. 37 : réseau d'antenne hexagonale.	72
Figure 2. 38 : Coefficient de réflexion du réseau d'antenne Hexagonal.	72
Figure 2. 39: Couplage entre les éléments de réseau.	73
Figure 2. 40 : Diagramme de rayonnement du réseau hexagonal en fonction de l'angle.	74
Figure 2. 41: Cellules FSS.	75
Figure 2. 42: Coefficient de réflexion du réseau avec FSS.	75
Figure 2. 43: Diagramme de rayonnement de l'antenne en fonction de l'angle θ .	76
Figure 2. 44: Tension totale du réseau hexagonale.	77
Figure 3. 1: Antenne multicouche de référence.	80
Figure 3. 2 : Dimensions de l'antenne de référence.	80
Figure 3. 3: Coefficient de réflexion de l'antenne de référence.	81
Figure 3. 4: Fente U gravée sur le patch.	81
Figure 3. 5: Antenne avec différentes formes de fentes.	82
Figure 3. 6: Coefficient de réflexion	82
Figure 3. 7: Dimensions de l'antenne à double bande.	83
Figure 3. 8: Coefficient de réflexion de l'antenne à double bande.	84
Figure 3. 9: Diagramme de rayonnement à la fréquence 3.5 GHz.	85
Figure 3. 10 : Diagramme de rayonnement de l'antenne à la fréquence 5.8 GHz.	85
Figure 3. 11: Emplacement et dimensions de la fente.	86
Figure 3. 12: Structure optimisée.	88
Figure 3. 13: Réalisation de l'antenne optimisée.	88
Figure 3. 14: Coefficient de réflexion de l'antenne à double bande.	89
Figure 3. 15: Diagramme de rayonnement à la fréquence 3.5 GHz.	90
Figure 3. 16: Diagramme de rayonnement à la fréquence 3.5 GHz.	90
Figure 3. 17: Redresseurs RF multi bandes : (a) avec un seul filtre passe-bande RF conçu pour une large bande RF, (b) pour plusieurs fréquences et (c) architecture utilisée. [1]	93
Figure 3. 18: Redresseur à double bande conçu.	94
Figure 3. 19: Coefficient de réflexion du redresseur.	95
Figure 3. 20: L'efficacité de conversion RF-DC du redresseur à la puissance -10 dBm.	96
Figure 3. 21: Tension de sortie du redresseur en fonction de la puissance d'entrée.	97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1: Comparaison entre les performances de 4 redresseurs pour les applications de la récupération d'énergie [4].....	17
Tableau 2. 1: Comparaison.	56
Tableau 3. 1: Comparaison.	91

RÉSUMÉ

La récupération d'énergie a attiré beaucoup d'intérêt ces dernières années. Cette technologie permet d'exploiter l'énergie ambiante RF disponible dans notre environnement en la convertissant en énergie continue à l'aide de la technologie des Rectennas. La Rectenna, qui est associée à un redresseur et une antenne, permet de récupérer l'énergie RF sans fil dans l'air pour la convertir en un courant continu (batterie). L'objectif de ce mémoire est de proposer un nouveau système Rectenna de type mono-bande et double-bandes pour les applications de récupération d'énergie radiofréquence (RF).

Un état de l'art des différentes Rectennas utilisées dans la littérature a été introduit, avec une explication de principe de fonctionnement. Plusieurs prototypes ont été développés et simulés : le premier prototype est une Rectenna à gain élevé, constituée d'une antenne micro-ruban à substrat multicouche alimentée par couplage et fonctionnant dans la bande de fréquence 5,8 GHz et un redresseur à base d'une seule diode Schottky. Pour améliorer le gain de cette antenne, la technologie des métamatériaux (FSS) a été utilisée pour atteindre un gain final de (la structure (antenne + FSS)) 13.1 dBi. La deuxième structure est basée sur un nouveau réseau hexagonale constitué du Rectenna (conçu précédemment) permettant de récupérer l'énergie à 360 degrés. Le troisième prototype concerne une nouvelle Rectenna à double bande fonctionnant à 3,5 GHz et 5,8 GHz, pour les applications de la récupération d'énergie. La Rectenna proposée consiste en une antenne double-bande à gain élevé et un redresseur double bande utilisant la diode Schottky comme élément de redressement. Une procédure d'optimisation utilisant l'algorithme génétique a été appliquée sur l'antenne pour atteindre un gain maximal de 10.2 dBi et 8.92 dBi dans les deux bandes, respectivement.

ABSTRACT

Energy Harvesting has attracted a lot of interest in recent years. This technology allows us to exploit the RF ambient energy available in our environment by converting it into continuous energy using Rectenna. The rectenna, which is associated with a rectifier and an antenna, allows wireless RF energy to be recovered in the air to convert it into a direct current (battery). The purpose of this thesis is to propose a new single-band and dual-band rectenna system for radio frequency (RF) energy Harvesting applications.

A state of the art of the different rectennas used in the literature has been introduced, with an explanation of the operating principle. Several prototypes have been developed and simulated: the first prototype is a high gain rectenna, consisting of a coupled multilayer substrate microstrip antenna operating in the 5.8 GHz frequency band and a rectifier based on a single Schottky diode. To improve the gain of this antenna, metamaterial technology (FSS) was used to achieve a final gain of (structure + antenna) 13.1 dBi. The second structure is based on a new hexagonal array consisting of rectenna (designed previously) to recover energy from 360 degrees. The third prototype is a new dual-band rectenna antenna operating at 3.5 GHz and 5.8 GHz for energy harvesting applications. The proposed Rectenna consists of a high gain dual band antenna and a double band rectifier using the Schottky diode as a rectifying element. An optimization procedure using the genetic algorithm was applied on the antenna to achieve a maximum gain of 10.2 dBi and 8.92 dBi in both bands, respectively.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Motivation :

Les communications sans fil ont connu un développement sans précédent au cours des dix dernières décennies, et ils sont devenus une partie intégrante de notre vie quotidienne [1]. Les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fil (WLAN) et les réseaux personnels sans fil (WPAN) ne sont que quelques exemples de la technologie sans fil que nous utilisons quotidiennement [1]. Ils nous permettent d'être connectés partout et à tout moment. Ces systèmes sans fil émettent également une bonne quantité d'énergie électromagnétique dans l'air sans l'exploiter efficacement.

De nos jours, le recyclage de l'énergie est devenu un problème très important dans le monde entier [2]. De ce fait, récolter et recycler l'énergie électromagnétique ambiante gaspillée est devenue un sujet de plus en plus intéressant dans le domaine académique et industriel en tant qu'une des méthodes les plus attirantes pour générer de l'énergie (courant continu, DC).

De même, l'Internet des objets (IoT) connecte des machines, des capteurs et d'autres objets à l'internet afin qu'ils puissent s'intégrer à notre réseau d'information [2]. Les réseaux de capteurs sans fil, RFID et la surveillance de l'état de santé peuvent tous être considérés comme des exemples des éléments de l'IoT [2]. L'IoT devrait révolutionner la manière dont nous surveillons notre santé, notre environnement et notre infrastructure et permet aussi d'améliorer l'efficacité, les performances et les services dans notre vie quotidienne. À vrai dire, une explosion du nombre d'appareils connectés à l'Internet est prévue, ce qui posera d'énormes défis à la fois en termes de spectre et d'alimentation électrique [2]. D'une part, de nouveaux protocoles de communication et des bandes passantes plus larges seront utilisées pour gérer ce grand nombre d'utilisateurs. D'autre part, les appareils électroniques seront déployés presque partout.

La prochaine génération des capteurs et de circuits sera littéralement intégrée aux éléments, donc leur maintenance sera problématique par le fait qu'ils seront difficiles à atteindre, et même à localiser. Cela signifie que le remplacement des batteries sera difficile, coûteux, peu pratique ou impossible de les remplacer ou de fournir une alimentation câblée [2].

Pour ces raisons, il est important d'éviter l'utilisations des batteries traditionnelles et de trouver une alternative efficace et fiable pour alimenter les circuits à partir des sources RF ambiantes. L'élément clé de ce système consiste en une antenne couplée à une unité de redressement. La combinaison d'une antenne et d'un redresseur est communément appelée Rectenna qui peut convertir l'énergie électromagnétique en énergie continue (DC).

Problématique :

La récupération de l'énergie RF est une technique potentielle pour répondre à la préoccupation de recharger ou de remplacement des batteries afin de mettre en œuvre des dispositifs autonomes dans le domaine des Internet des objets (IoT). Ce système d'antenne est basé sur l'utilisation des Rectennas pour extraire l'énergie RF émise par les infrastructures de communication telles que les systèmes Wifi, cellulaires.... Les chercheurs pensent toujours à avoir une Rectenna avec une bonne efficacité de conversion, avec une tension élevée de sortie afin de satisfaire les besoins énergétiques.

Un défi majeur dans la récupération de l'énergie radiofréquence est la densité de puissance RF extrêmement faible disponible dans l'environnement qui limite considérablement la puissance disponible pour la récolter, ce qui donne un faible rendement de conversion de puissance RF -DC [3]. Pour pallier ce problème, il s'est avéré nécessaire de concevoir des antennes avec des gains élevés, afin d'augmenter la quantité de l'énergie à récupérer, ou bien travailler avec des antenne multi bandes pour récolter l'énergie de plusieurs bandes de fréquences [3].

Un autre inconvénient de la faible densité de puissance RF est la faible tension de sortie. Parmi les solutions qui ont été proposées pour augmenter cette tension, est l'utilisation de plusieurs antennes en même temps placées l'une à côté des autres puis faire la sommation des tensions de sorties. Cette technique permet d'augmenter considérablement la taille du système ce qui pose un vrai problème pour l'utiliser dans le remplacement des batteries [3].

Objectifs :

Le but de ce travail est de concevoir et de réaliser des Rectennas destinées à la récupération de l'énergie électromagnétique pour la convertir en énergie DC avec un maximum de tension de sortie. Les objectifs visés dans ce projet peuvent être classés comme suit :

1- Faire la conception et la réalisation d'une antenne avec un gain élevé, fonctionnant à la fréquence 5.8 GHz. Dans cette partie on va utiliser la technologie des FSS pour augmenter davantage le gain de l'antenne. Autrement dit, le but est d'optimiser les cellules des FSS afin d'obtenir un gain le plus élevé possible. Pour ce faire, un redresseur à la fréquence 5.8 GHz va être conçu et réalisé, pour avoir une bonne efficacité aux faibles puissances, avec une bonne tension de sortie.

2- La conception d'un réseau hexagonale à gain élevé fonctionnant à la fréquence 5.8 GHz. Ce réseau permet de résoudre plusieurs problèmes tels que ; permet d'utiliser six antennes en même temps en gardant une taille compacte du système, en plus, il va récolter l'Energie électromagnétique dans toutes les directions (360 degrés) avec un gain élevé, et la tension de sortie de chaque antenne va être additionner ce qui va multiplier la tension d'une seule Rectenna par le facteur 6.

3- La conception et la réalisation d'une Rectenna à double bandes 3.5 GHz et 5.8 GHz. Cette antenne fournit un gain élevé dans les deux bandes, en utilisant la puissance d'optimisation de l'algorithme génétique, afin d'atteindre le maximum de gain dans les

deux bandes. Par la suite, la conception et la réalisation d'un redresseur à double bandes sera effectué pour générer une tension continue dans les deux bandes. L'objectif principal est d'avoir une bonne efficacité de conversion dans les deux bandes.

Contributions :

Les travaux issus de ce mémoire ont fait objet de 5 articles de conférence et deux articles de revue en préparation :

Conférences :

1- **M. C. Derbal**, A. Zeghdoud and M. Nedil, "A Novel Dual Band Antenna Design for WiFi Applications Using Genetic Algorithms," 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston, MA, 2018, pp. 1009-1010.

2- A. Zeghdoud, **M. C. Derbal** and M. Nedil, "Optimization of a Dual-band Microstrip antenna Array using Genetic Algorithms," 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston, MA, 2018, pp. 1005-1006.

3- **M. C. Derbal**, A. Zeghdoud and M. Nedil, " A High Gain Rectenna For Energy Harvesting Applications," 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Atlanta, 2019. (Accepté)

4- **M. C. Derbal**, A. Zeghdoud and M. Nedil, " A Novel UWB Antenna For Wireless Communications Systems Using Genetic Algorithms," 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Atlanta, 2019. (Accepté)

5- A. Zeghdoud, **M. C. Derbal** and M. Nedil, " Gain Optimization of a Yagi-Uda Antenna using the Genetic Algorithm," 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Atlanta, 2019. (Accepté)

Journals:

1- **M.C Derbal** and M. Nedil, "A Novel Hexagonal Array RF Energy Harvester With Output Voltage Up To 5.4 V," Electronics Letters. (en préparation)

2- **M. C. Derbal** and M. Nedil, "A High Gain Dual Band Rectenna For Energy Harvesting Using Genetic Algorithms," IEEE Antenna And Propagation Letters. (en préparation)

Plan de la thèse :

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre présente l'état de l'art des antennes Rectennas utilisées dans la récupération d'énergie. Dans ce chapitre, nous aborderons l'architecture de base des Rectennas, puis nous expliquerons le principe de fonctionnement des Rectennas dans le but de convertir l'énergie RF en énergie continue. L'état de l'art des différentes antennes utilisées dans la littérature sera également introduit. Nous nous concentrerons davantage sur les Rectennas mono-et double-bande.

Dans le deuxième chapitre, nous proposons une Rectenna à gain élevé pour l'application de la récupération d'énergie. Ce système d'antenne est constitué d'une antenne micro-ruban à substrat multicouche avec une alimentation par couplage EM fonctionnant à la fréquence 5,8 GHz. Pour améliorer le gain de cette antenne, des cellules FSS seront utilisées. Un redresseur destiné à récupérer l'énergie RF dans la bande Wi-Fi 5,8 GHz est conçu avec une seule diode Schottky, servant comme élément de redressement. En fait, le redresseur présente un bon rendement de conversion de 40% à -3 dBm. De même, nous proposons un nouveau réseau d'antenne hexagonal permettant de récupérer l'énergie à 360 degrés. Cette technique est utilisée pour la première fois dans les applications de la récupération d'énergie. En utilisant un combinateur à courant continu, cette structure nous a permis de multiplier la tension de sortie du Rectenna par un facteur de 6.

Le troisième chapitre concerne un nouveau système Rectenna à double bande pour les applications de récupération d'énergie. La Rectenna proposée consiste en une antenne double-bandes à gain élevé et un redresseur (double bande aussi) utilisant la diode Schottky comme élément de redressement. L'antenne proposée est une antenne micro-ruban avec une structure de substrat multicouche avec alimentation couplée, et une fente en forme de U gravée sur le patch pour obtenir la réponse en bande double. À la fin, une procédure d'optimisation utilisant les algorithmes génétiques est appliquée afin d'obtenir le gain maximal possible dans les deux bandes de fréquences.

Le dernier chapitre concerne la conclusion générale, pour clore ce mémoire, en faisant un bilan des résultats obtenus.

CHAPITRE 1

ETAT DE L'ART SUR LA RECUPERATION D'ENERGIE DES ONDES ELECTROMAGNETIQUE.

1.1 Introduction :

Récemment, la diminution de la consommation des composants électroniques a conduit au développement de dispositifs sans fil [1]. Dans ce domaine, les capteurs sans fil communiquent les uns avec les autres et recueillent différentes données telles que la température, la pression, l'humidité, etc. Ils sont utilisés dans divers scénarios, tels que le système de surveillance, domotiques, médicales ou militaires [1].

Aujourd'hui, ces capteurs sont alimentés par des batteries. Malgré des progrès significatifs, ces batteries ont encore une durée de vie limitée et leur remplacement est souvent compliqué [2]. Cela explique l'urgence de trouver d'autres alternatives pour alimenter ces objets. Une technique prometteuse consiste à récupérer l'énergie qui existe déjà dans notre environnement, par exemple, l'énergie thermique, les vibrations mécaniques, la lumière ou les ondes électromagnétiques, qui pourraient servir à cela [2].

Contrairement à la plupart des sources d'énergie, les sources électromagnétiques EM ou RF comme le Wifi, le WiMax, GSM sont disponibles en permanence. Bien qu'il soit omniprésent dans notre vie quotidienne, l'inconvénient de ces sources RF est que la densité de puissance qu'elles peuvent fournir est faible [2].

Le système responsable de la récupération de l'énergie radiofréquence est appelé Rectenna. Il s'agit d'une antenne couplée avec un redresseur. Le rôle de ce système est

d'absorber l'énergie radiofréquence RF, et le redresseur a pour fonction de convertir cette énergie absorbée en énergie continue [2].

Dans ce chapitre, nous allons introduire l'architecture de base d'une Rectenna, et son principe de fonctionnement. Après, on va discuter de la densité de puissance radiofréquence disponible, et sa relation avec l'efficacité de conversion, puis les différentes architectures du redresseur utilisé.

1.2 Les systèmes de récupération d'énergie radio fréquence :

1.2.1 Vue d'ensemble d'un récupérateur d'énergie RF

Un système de récupération d'énergie RF est composé de plusieurs éléments. Comme on le voit dans la Figure 1.1, une source de rayonnement, tel qu'un émetteur RF ou une station de base GSM, est utilisée pour diffuser un signal RF. Ce signal électromagnétique émis est ensuite collecté par une antenne de réception, puis, cette énergie est convertie en une puissance électrique continue utilisable par l'intermédiaire d'un circuit de conversion RF-DC. Ensuite, la puissance électrique continue peut directement alimenter la charge (ex. capteur). Celle-ci peut également être placée dans un élément de stockage si par exemple la puissance récupérée est supérieure à la puissance nécessaire pour l'alimentation de la charge. Enfin, si la tension de sortie du récupérateur d'énergie RF n'est pas suffisante ou fluctuante, un convertisseur DC-DC peut être ajouté entre la sortie du récupérateur et la charge.

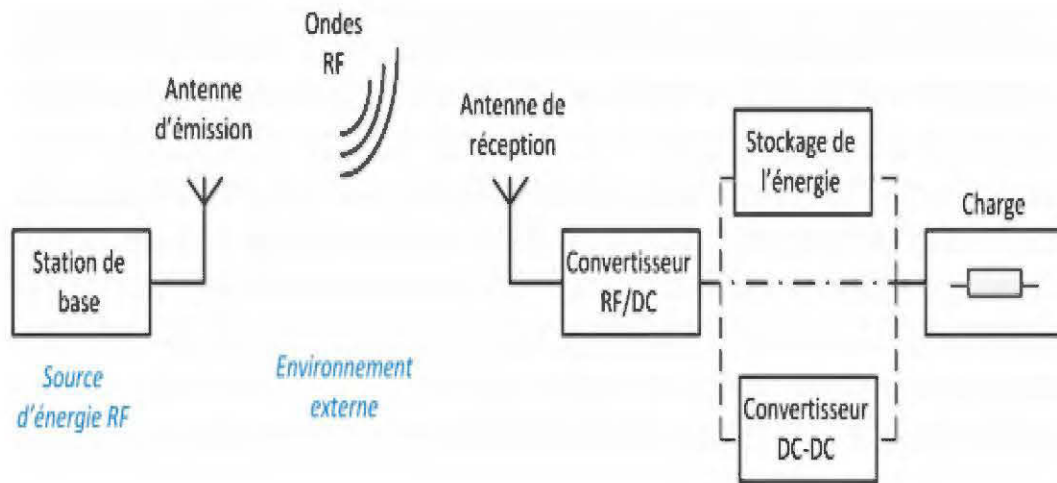


Figure 1.1: Architecture globale de la récupération d'énergie [4].

1.2.2 L'architecture de base d'une Rectenna.

Le but d'un récupérateur d'énergie RF, également appelé Rectifying Antenna ou Rectenna, consiste à convertir l'énergie électromagnétique provenant des sources RF ambiantes en une tension électrique continue. Une Rectenna typique se compose d'une antenne de réception suivie d'un réseau d'adaptation d'impédances, d'un redresseur, d'un filtre DC ainsi qu'une charge représentant l'impédance équivalente du capteur à alimenter (Figure 1.2).

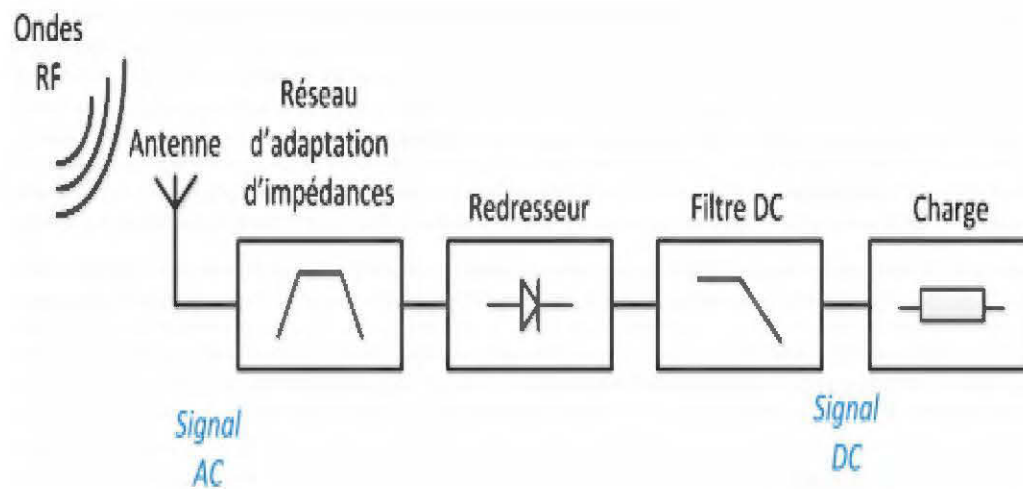


Figure 1.2: Architecture de base d'une Rectenna [4].

Le réseau d'adaptation d'impédances a pour rôle de réaliser une adaptation d'impédances entre l'antenne de réception et le redresseur à la fréquence désirée, ainsi qu'à la puissance RF incidente donnée. Le redresseur réalise la conversion du signal AC reçu à la sortie du réseau d'adaptation d'impédance en un signal continu. Il est généralement constitué de diodes et de condensateurs. Le filtre de sortie DC permet de filtrer les harmoniques HF et de laisser passer uniquement la composante continue. Il peut également réaliser une adaptation d'impédances entre le circuit de redressement et la charge pour une puissance DC donnée.

1.3 Vue d'ensemble de la conception d'une Rectenna :

1.3.3 Densité de puissance radio fréquence disponible.

Pour évaluer les applications potentielles pouvant bénéficier de la récupération de l'énergie RF, il est nécessaire d'étudier la quantité de puissance RF disponible dans l'environnement ambiant. Dans cette section, une brève revue de littérature de certains systèmes Rectenna est présentée.

Une étude approfondie des niveaux de puissance RF ambiante dans la gamme de fréquences de 0,3 GHz à 2,5 GHz a été réalisée à Londres [5]. Des mesures ont été prises à chaque station du réseau de métro londonien à différentes dates et à différentes heures pour étudier la quantité des niveaux de puissances RF dans la ville et leurs fluctuations dans le temps. Les auteurs ont utilisé une antenne omnidirectionnelle et un analyseur de spectre portable pour mener l'enquête. La densité de puissance RF (en dBm / cm²) a été calculée à partir des mesures du champ électrique. La densité de puissance RF mesurée à la station du métro Northfields London est illustrée dans la Figure 1.3. Les bandes de fréquences spectrales pour la télévision numérique (DTV), GSM900, GSM1800, 3G et WiFi ont été mesurées

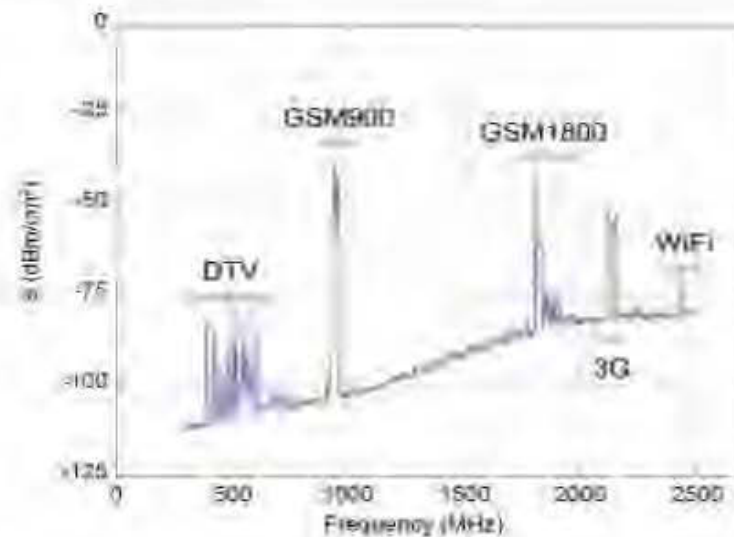


Figure 1.3: Densité de puissance RF mesurée à la station de métro Northfields London [5].

Sur la base des mesures de la Figure 1.3, les auteurs ont conçu des antennes dipôles pour les bandes spectrales DTV, GSM900, GSM1800 et 3G destinées à la récupération de l'énergie RF. Les auteurs ont conçu à la fois une antenne patch et une antenne filaire pour chaque bande de fréquence. Les antennes patch ont un gain de 4,32 dBi à 4,42 dBi et les antennes filaires ont un gain de 4,48 dBi à 4,76 dBi.

À l'aide des antennes conçues, la quantité d'énergie à l'intérieur d'un bâtiment de l'Imperial College London (ICL) a été mesurée, tel qu'illustrée dans la figure 1.4.

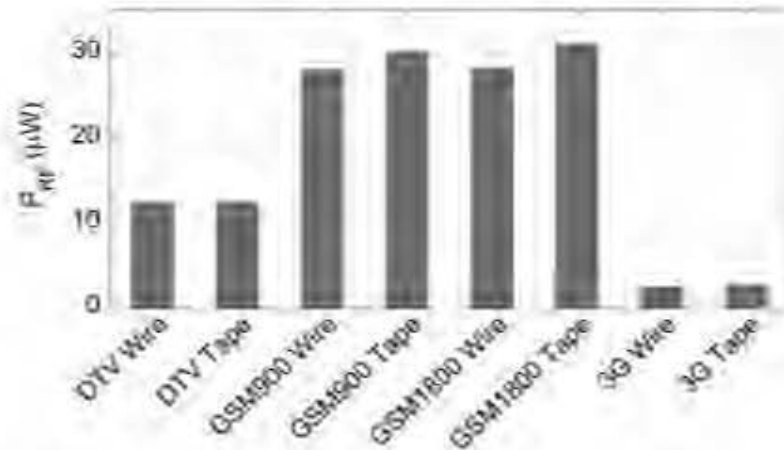


Figure 1. 4: Puissance RF mesurée à l'intérieur d'un bâtiment ICL [5].

Comme le montre la figure 1.4, la puissance RF mesurée dans les bandes spectrales GSM900 et GSM1800 avec les deux antennes est d'environ $30 \mu W$. Pour les bandes DTV et 3G, il est d'environ 12 et $3 \mu W$, respectivement.

Afin de mentionner quelques ordres de grandeurs, la Figure 1.5 donne une estimation des puissances nécessaires pour le fonctionnement de plusieurs capteurs et appareils électroniques. Les différents types de récupération d'énergie sont également énumérés et répertoriés dans cette figure en fonction de leur capacité à fournir ces niveaux d'énergie. La gamme des capteurs, pour lesquelles nous allons nous concentrer dans ce mémoire, est celle des systèmes de consommation de l'ordre du microwatt. Ainsi, du fait de l'encombrement des systèmes, plusieurs énergies ne seront pas être considérées ici comme par exemple l'énergie éolienne, géothermique ou encore l'hydroélectricité.

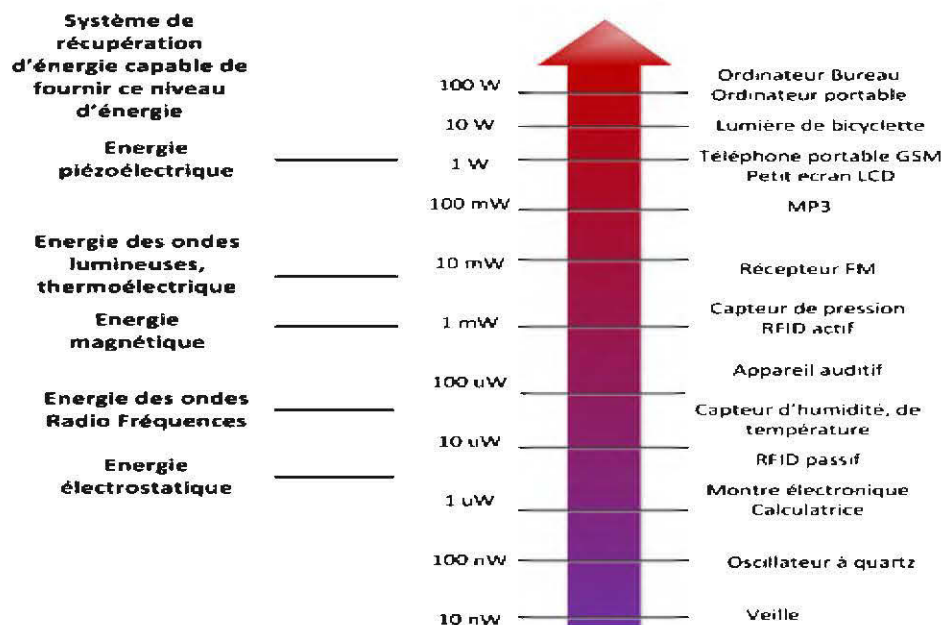


Figure 1. 5: Echelle du besoin en puissance pour des appareils électroniques et récupération des énergies associées [4].

1.3.4 Différentes architectures du redresseur.

Comme mentionné précédemment, l'élément clé d'un circuit de récupération d'énergie RF est le redresseur. Il existe différentes topologies des redresseurs RF fonctionnant à des niveaux de puissances faibles. Les topologies de redresseur les plus populaires comprennent les séries simples, les parallèles simples, le pont de Greutz et le doubleur de tension [4]. Parmi les autres topologies moins populaires, on trouve les circuits multiplicateurs de tension de Villard et Greinacher [4]. La figure 1.6 montre les différentes architectures des redresseurs utilisés dans la récupération d'énergie.

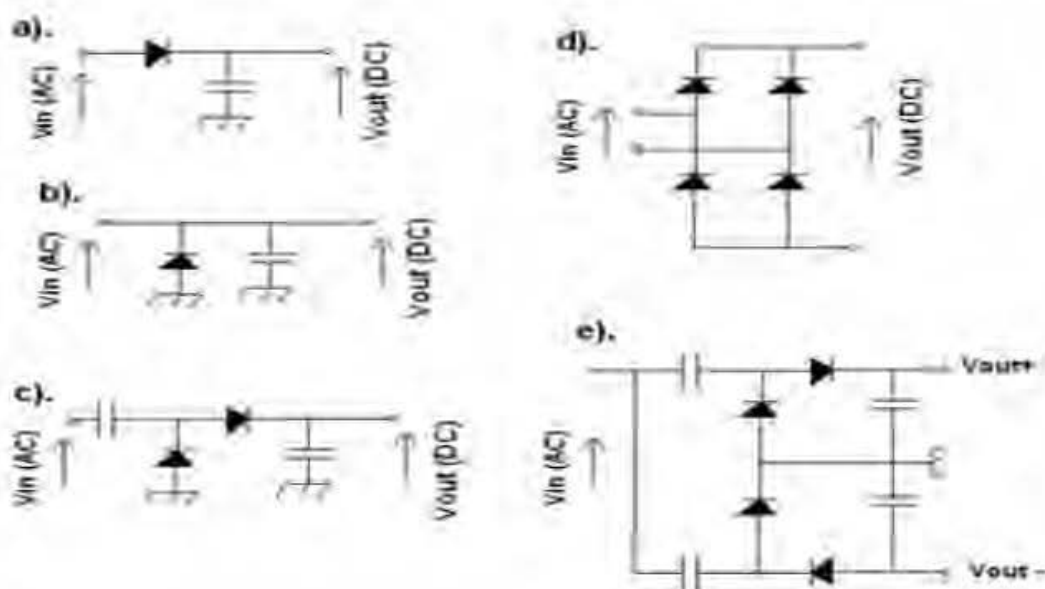


Figure 1. 6: Différentes architectures des redresseurs : a) série, b) parallèle, c) doubleur de tension, d) pont de Greatz, e) Greinacher [4].

Les topologies série et parallèle sont les plus utilisées dans la littérature. Le redresseur simple série, également appelé redresseur demi-onde, consiste en une diode unique en série avec un condensateur C parallèle, comme illustré dans la figure 1.6 (a). La diode redresse la tension d'entrée alternative V_{in} et le condensateur C parallèle qui agit comme un filtre passe-bas pour ne permettre de passer que la composante de tension de sortie continue V_{out} . Par ailleurs, le redresseur parallèle, illustré dans la figure 1.6 (b), consiste en une seule diode en parallèle avec un condensateur C , qui agit comme un filtre passe-bas. La tension d'entrée redressée par la diode passe ensuite à travers le filtre C pour ne laisser apparaître que la composante continue V_{out} à la sortie. Théoriquement, dans les applications de la récupération d'énergie, aucune topologie entre les deux n'a un avantage sur l'autre en termes d'efficacité de conversion. Ces deux types de redresseur (série et parallèle), sont très utilisés pour les faibles puissances d'entrée (moins de -10 dBm). Pour les autres redresseurs comme doubleur de tension,

pont de Greatz, et Greinacher, ils fournissent une tension de sortie plus grande que le redresseur avec une seule diode, mais pour une puissance d'entrée élevée.

Chaque redresseur présente des avantages et des inconvénients. Pour notre cas, on va analyser leurs performances dans le contexte de la récupération d'énergie, qui nécessite un redresseur qui offre de bonnes performances dans les conditions où la puissance disponible est faible (< -5 dBm).

La Figure 1.7 montre la tension de sortie des différents redresseurs en fonction de la puissance d'entrée. On remarque que le redresseur série fournit la meilleure tension de sortie pour toutes les puissances inférieures à -5 dBm.

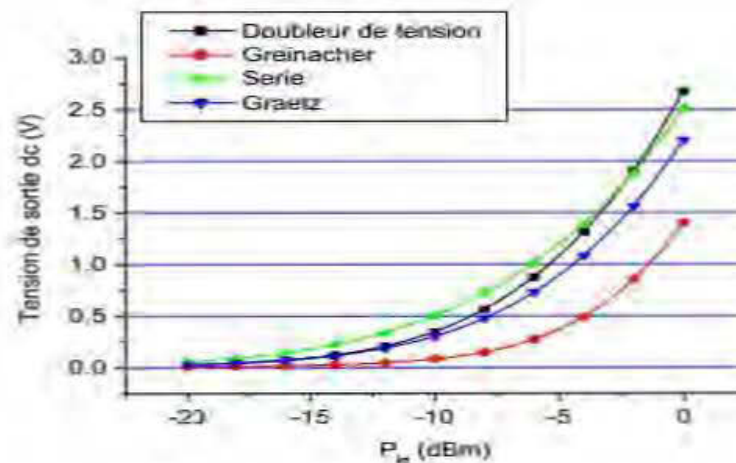


Figure 1. 7: Tension de sortie en fonction de la puissance incidente pour les redresseurs : doubleur de tension, Greinacher, Série et Graetz [4].

La Figure 1.8 montre aussi l'efficacité de conversion de chaque redresseur en fonction de la puissance incidente. On remarque que le redresseur en série possède la meilleure efficacité de conversion par rapport aux autres types de redresseurs pour une faible puissance incidente inférieure à -3 dBm. Pour une puissance incidente supérieure à -3 dBm, le doubleur de tension a la plus grande efficacité de conversion, relativement aux deux autres diodes (Greinacher, Graetz). Ils fonctionnent avec 4 diodes qui va

nécessiter une grande puissance incidente pour assurer un bon fonctionnement, généralement supérieure à 5 dBm.

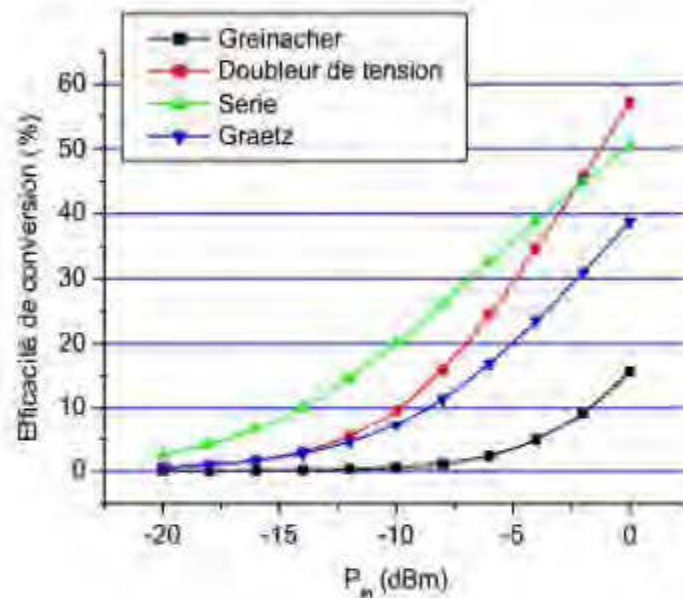


Figure 1. 8 : Tension de sortie en fonction de la puissance incidente pour les redresseurs : doubleur de tension, Greinacher, Série et Graetz [4].

Le tableau ci-dessous illustre les performances de 4 redresseurs proposés pour les applications de la récupération d'énergie [4]. On remarque que le redresseur avec une seule diode en série est le meilleur redresseur pour les applications de la récupération d'énergie, que ce soit en termes d'efficacité de conversion ou bien de tension de sortie pour des puissances incidentes inférieure à -10 dBm.

Tableau 1. 1: Comparaison entre les performances de 4 redresseurs pour les applications de la récupération d'énergie [4].

Redresseur	Amplitude de la Tension de sortie dc	Démarrage à Faibles niveaux de puissance RF incidente (< -10 dBm)	Efficacité de conversion
Série	+	+	++
Pont de Graetz	++	-	-
Parallèle	-	+	+
Doubleur de tension	++	-	-
Greinacher	++	-	-

1.3.5 Exemple de fonctionnement d'un redresseur série :

Une diode idéale série simulée à 2 GHz en utilisant le logiciel ADS est montrée dans la Figure 1.9.

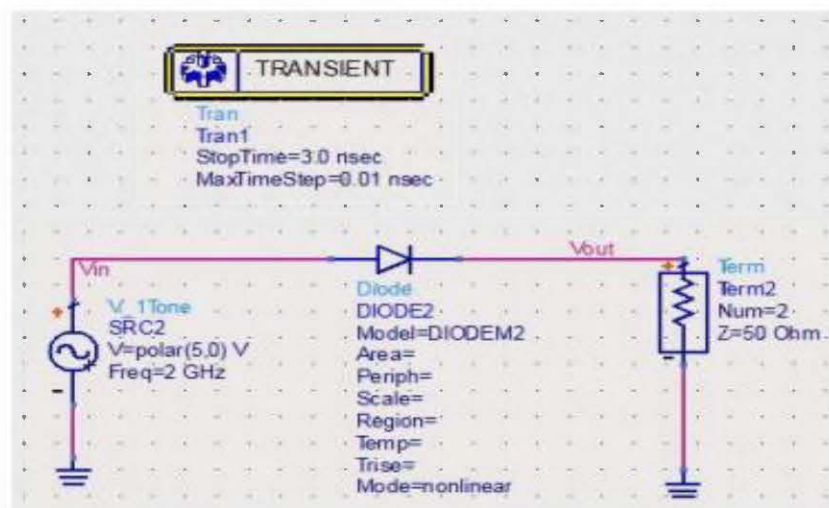


Figure 1. 9: Exemple d'un redresseur série.

Le rôle de cette diode est d'éliminer les alternances négatives générées par la source comme montré dans la figure 1.10.

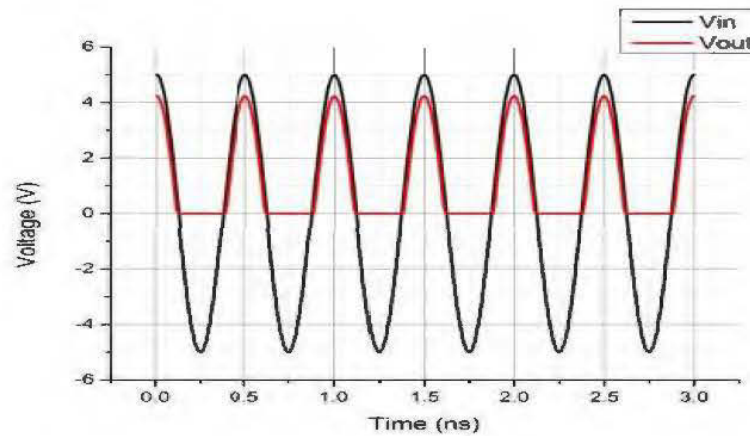


Figure 1. 10 : La forme d'onde du signal incident et du signal de sortie en fonction du temps.

Un condensateur de lissage est utilisé dans le redresseur à une diode représenté dans la Figure 1.11.

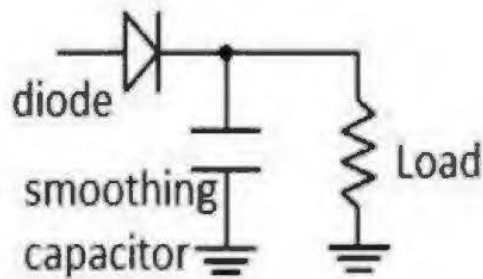


Figure 1. 11 : Redresseur demi-onde à une diode.

Le condensateur de lissage peut rendre la sortie plus constante et stable. Le résultat du signal de sortie avec et sans condensateur de lissage est donné à la Figure 1.12.

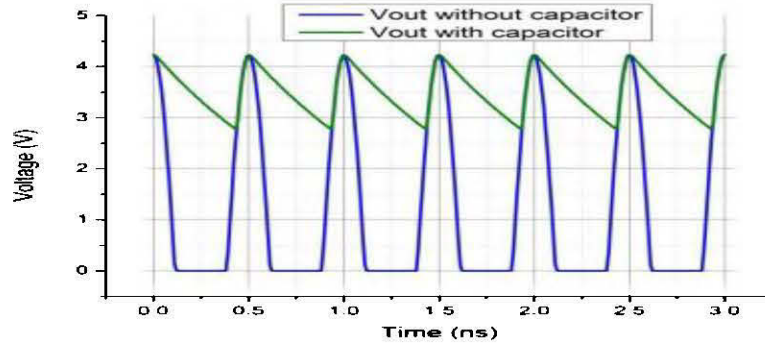


Figure 1. 12 : Tension de sortie pour le redresseur à une diode avec et sans lissage

1.3.6 Efficacité de conversion d'une Rectenna :

Le rendement de conversion RF-DC du Rectenna est défini comme étant le rapport de la puissance de sortie P_{out} sur la puissance d'entrée P_{in} [6] :

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \left(\frac{V_{dc}^2}{R_{load}} \right) \frac{1}{P_d A_{eff}}$$

Cette efficacité de conversion dépend fortement de la distribution de la densité de puissance (P_d) à travers le récepteur. La surface effective de l'antenne de réception (A_{eff}) peut être calculée en utilisant le gain (G_r) et la longueur d'onde λ_o

$$A_{eff} = \left(\frac{\lambda_o^2}{4\pi} \right) G_r$$

La densité de puissance incidente maximale peut être calculée de la manière suivante ; En supposant une antenne présentant un gain de G_t au niveau de l'émetteur, la directivité est de : [6]

$$D_o = \frac{4\pi A_t}{\lambda_o^2}$$

Ce qui signifie que la puissance du faisceau principal est amplifiée de D_0 dans une certaine direction.

A_t est la surface effective de l'antenne d'émission. En plus, la distance d , qui est la distance entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice, doit être relativement grande pour que la Rectenna puisse fonctionner dans le champ lointain. Par conséquent, la densité de puissance maximale reçue est obtenue par [6] :

$$P_d = \frac{P_t G_t}{\lambda_o^2 d^2}$$

De cette équation, on remarque qu'un P_d plus élevé nécessite un G_t plus grand.

Dans la littérature, il existe deux méthodes pour définir l'efficacité de conversion d'un redresseur. Comme montré dans la figure 1.13, on peut définir deux puissances d'entrées P_{in} et P_{in1} . La première efficacité de conversion qu'on peut définir dépend de la puissance reçue par l'antenne P_{in} , dans ce cas l'efficacité de conversion est exprimée :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.1)$$

La deuxième définition de l'efficacité dépend de la puissance reçue par le redresseur qui est égale :

$$P_{in1} = \eta_1 * P_{in}$$

Tel que η_1 est l'efficacité de conversion de l'antenne :

$$\eta_r = \frac{P_{out}}{P_{in1}} = \frac{P_{out}}{P_{in} * \eta_1} \quad (1.2)$$

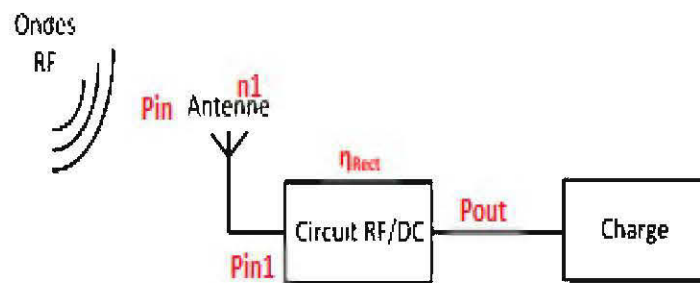


Figure 1. 13 : Schéma d'un récupérateur d'énergie RF [4].

Pour le reste du travail de ce mémoire, on va utiliser la deuxième définition, qu'est la plus utilisée dans la littérature.

1.3.7 Le réseau d'adaptation d'impédances

L'objectif de l'adaptation est d'assurer un transfert maximal de la puissance disponible du générateur (E_g et d'impédance interne Z_g), vers la charge Z_L (Figure.1.14).

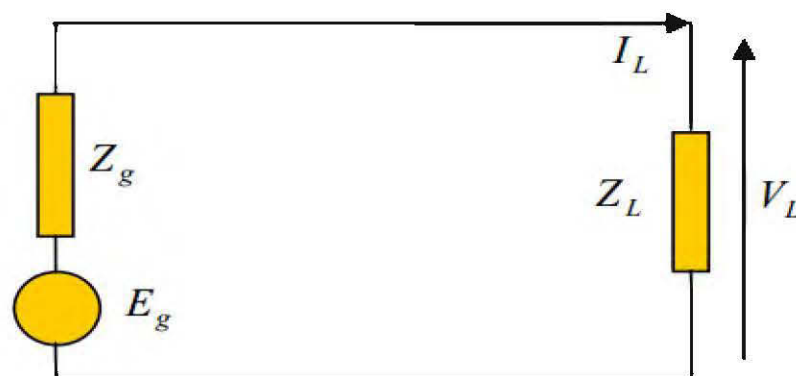


Figure 1. 14 : Charge alimentée par un générateur.

Le problème est que, le plus souvent, cet état n'existe pas, ce qui engendre évidemment des pertes non seulement par effet Joule mais aussi par réflexion et même par rayonnement [7]. Ce phénomène est bien perceptible en micro-onde du fait que les dimensions des circuits ne soient pas négligeables comparativement à la longueur d'onde.

Malgré cela, il existe une solution qui consiste à intercaler, entre le générateur et la charge, un quadripôle passif non dissipatif, appelé quadripôle adaptateur. Pour trouver le quadripôle approprié, il faut établir la condition conduisant à l'adaptation. Un modèle électrique simple de la Rectenna incluant un réseau d'adaptation d'impédances est illustrée dans Figure 1.15. L'antenne est modélisée par une source de tension alternative V_g , avec une impédance de sortie $Z_{ant} = R_g + jX_g$. Enfin, Z_L représente l'impédance complexe du redresseur et de la charge combinée avec R_L et X_L les parties réelles et imaginaires, respectivement.

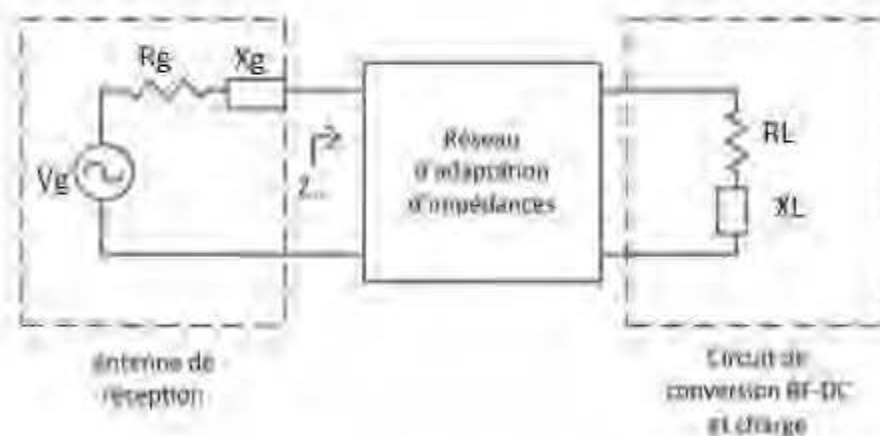


Figure 1. 15 : Circuit équivalent de la Rectenna [4].

Donc la puissance délivrée à la charge est :

$$P_L = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(V_L I_L^*) = \frac{|E_g|^2 R_L}{2 \left[(R_L + R_g)^2 + (X_L + X_g)^2 \right]}$$

La valeur du couple (R_L, X_L) qui maximise P_L est obtenue en annulant les dérivées partielles, on trouve : $Z_L = Z_g^*$

Cette équation exprime la condition d'adaptation. La charge dans ce cas absorbe la puissance maximale qui vaut :

$$P_{dis} = \frac{|E_g|^2}{8R_g}$$

Le quadripôle adaptateur a donc pour rôle de présenter au générateur une impédance d'entrée égale $Z_e = Z_g^*$.

Supposons que les grandeurs $X_i (i=1, 2 \dots N)$ soient les paramètres caractérisant le ou les éléments constitutifs du quadripôle, la partie réelle R_e et la partie imaginaire X_e de Z_e dépendent alors de ces grandeurs et aussi des caractéristiques de la charge ainsi que de la fréquence f_o de réalisation du circuit :

$$\begin{cases} R_e = F(R_L, X_L, X_i, f_o) \\ X_e = G(R_L, X_L, X_i, f_o) \end{cases}$$

C'est donc un système de deux équations, il doit par conséquent comporter deux paramètres inconnus $X_i (i=1,2)$, ce qui signifie que le quadripôle adaptateur ne peut être constitué que de deux éléments à valeur réglable.

Il faut noter que la résolution de ce système se fait à la fréquence f_o , ce qui confère à cette adaptation un caractère sélectif (bande étroite). Non seulement ça, mais dans le cas du redresseur, et comme on peut constater de l'équation précédente, il y'a trois facteurs qui influencent sur l'adaptation de redresseur :

- La fréquence f_o : l'adaptation se fait à une seule fréquence.

- La charge R_L : La valeur de la charge R_L influence sur l'adaptation, si on fait l'adaptation à une valeur donnée de R_L , le changement de cette valeur peut rendre le système non adapté.
- La puissance incidente P_{IN} : Comme la diode utilisée possède des caractéristiques non linéaires, donc son impédance d'entrée change avec le changement de la puissance incidente qui va influencer sur l'adaptation de tout le système, donc cette adaptation se fait à une valeur spécifique de la puissance d'entrée.

Suivant la nature des éléments entrant dans la composition du quadripôle adaptateur, on parle d'adaptation utilisant des éléments localisés, ou des éléments distribués, ou des éléments semi localisés. Deux topologies (Figure 1.16) permettent de réaliser l'adaptation d'une charge complexe Z_L quelconque où :

- Les éléments localisés sont des réactances (capacité et inductance).
- Les éléments semi localisés ou distribués (ligne de transmission).

Il est clair que si l'adaptation est effectuée à l'entrée du quadripôle adaptateur, il se trouve que sa sortie est aussi adaptée.

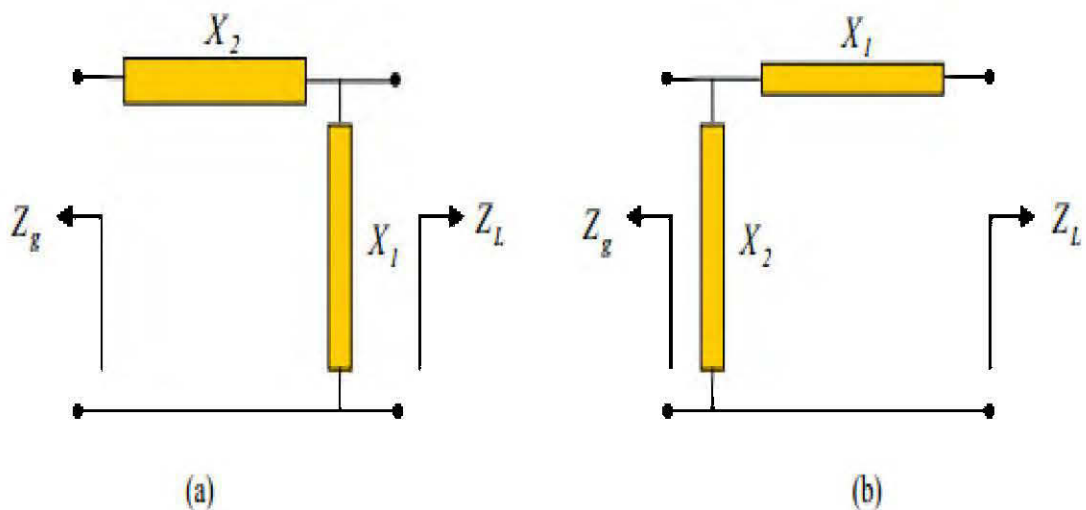


Figure 1. 16 : Réseaux d'adaptation.

On s'intéresse exclusivement au cas pratique où l'impédance équivalente de l'antenne est toujours réelle (50 Ohm) à la fréquence de fonctionnement. Le premier élément, X_1 en partant de la charge à adapter, permet de rejoindre le cercle à partie réelle d'admittance (Figure 1.16a) ou d'impédance (Figure 1.16b) égale à un.

L'abaque de Smith de la figure 1.17 représente les différentes zones des charges pouvant être adaptées.

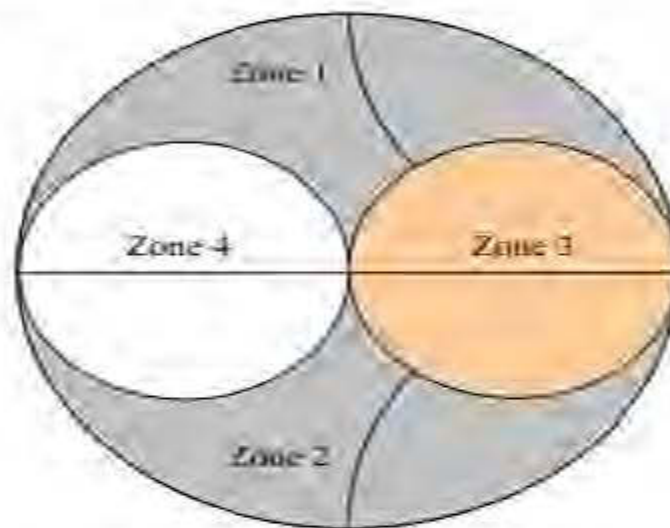
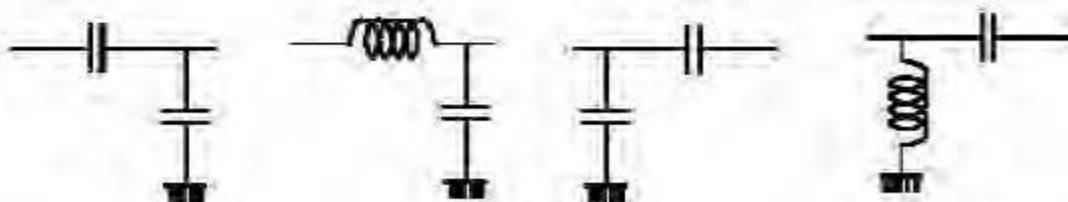
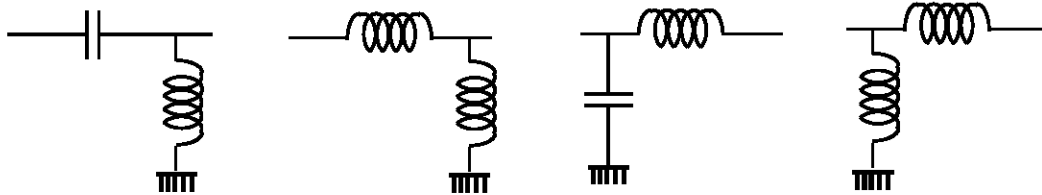
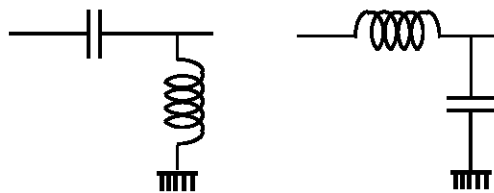
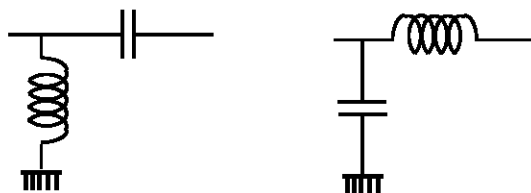


Figure 1. 17: Zones des charges pouvant être adaptées.

Chaque zone correspond à des topologies particulières des quadripôles adaptateurs :

Zone 1 (4 structures) : Ajoute C et L devant les composants



Zone 2 (4 structures) :**Zone 3 (2 structures) :****Zone 4 (2 structures) :**

1.4 Revue de littérature sur les Rectennas utilisées dans les applications de récupération de l'énergie

Il existe plusieurs techniques dans la littérature pour augmenter la puissance continue produite par la Rectenna, parmi elles on trouve l'augmentation de l'efficacité. Une conception de Rectenna est proposée pour les capteurs RFID commerciaux pour remplacer / recharger les batteries existantes (Figure 1.18). La Rectenna proposée récupère la puissance électromagnétique ambiante à la bande ISM de 2,45 GHz. Un circuit redresseur Schottky à deux étages de Dickson est combiné à une antenne

miniature pour former la Rectenna proposée dont les performances sont évaluées avec un interrogateur RFID commercial à 2,45 GHz. L'efficacité de conversion mesurée du redresseur est égale à 70% sur une large gamme de puissance d'entrée [8].

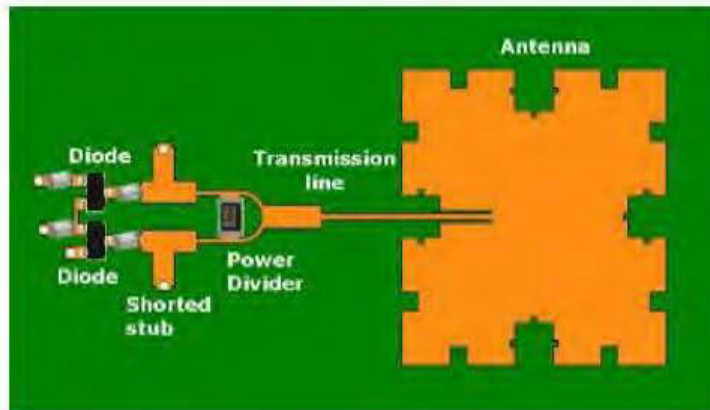


Figure 1.18 : Rectenna proposée pour les applications RFID [8].

Un autre élément Rectenna à haute efficacité a été conçu et testé à 5,8 GHz (Figure 1.19). L'antenne dipôle et les circuits de filtrage sont imprimés sur un substrat Duroid mince [9]. Une diode Schottky de silicium avec une basse tension de claquage est utilisée comme un dispositif de redressement. L'élément Rectenna a été testé et atteint un rendement de conversion RF-à-DC de 82% pour un niveau de puissance d'entrée de 50 mW.

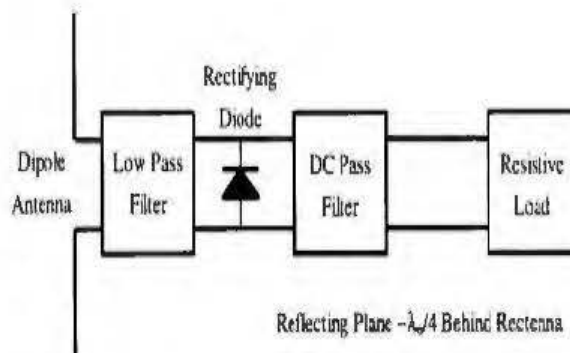


Figure 1.19 : Structure de la Rectenna proposée dans [9].

Dans [10], une Rectenna de 2,45 GHz, pour la collecte d'énergie RF de faible puissance, est présentée. L'efficacité de la Rectenna pour une faible puissance d'entrée est améliorée de deux aspects. Tout d'abord, une antenne compacte à gain élevée de 8.5 dBi est conçue pour la Rectenna, surmontant ainsi le compromis entre la taille et le gain si un réseau d'antennes est utilisé. Puisque la surface effective d'une antenne est proportionnelle à son gain, l'utilisation d'une antenne à gain élevé est capable de recevoir plus de puissance pour la rectification dans lorsque la puissance incidente est faible. Deuxièmement, comme le montre la figure 1.20, l'antenne est conçue avec le redresseur, et leur performance d'adaptation est optimisée pour les puissances d'entrée faibles. Par conséquent, la nouvelle Rectenna dans cet article est capable de recycler la Puissance radiofréquence avec une efficacité de conversion de l'ordre de 83%

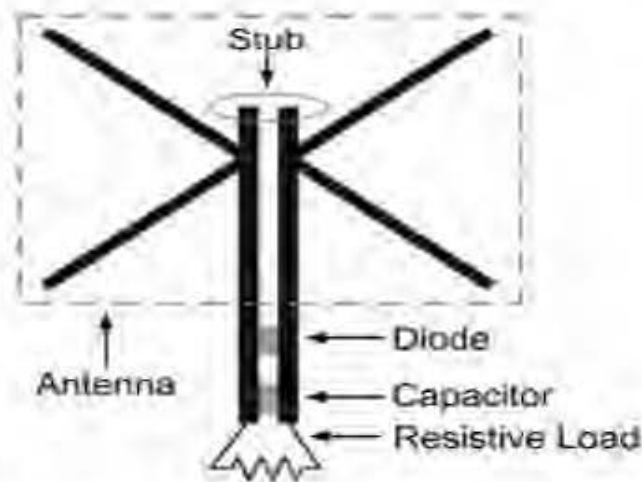


Figure 1. 20 : Rectenna proposée dans [10].

Une antenne micro-ruban différentielle à gain amélioré pour la récupération d'énergie RF est introduite dans [11]. Il s'agit d'une antenne rectangulaire double à couplage électromagnétique. Le patch en bas ($L \times W$) est fabriqué avec une entrée / sortie différentielle. Le patch supérieur ($L_{top} \times W_{top}$) est fabriqué dans une configuration à microbande suspendue inversée, qui fournit également un couvercle

diélectrique pour l'antenne (Figure 1.21). L'antenne est conçue et fabriquée pour la bande GSM900 (890-960 MHz). L'antenne a un gain de 8,5 dBi à la fréquence centrale et présente un $VSWR \leq 2$ pour des fréquences comprises entre 870 MHz et 1,05 GHz. Cette antenne a été développée pour les applications dans la collecte d'énergie, les étiquettes RFID et dans les circuits de communication sans fil, où des entrées / sorties différentielles sont nécessaires.

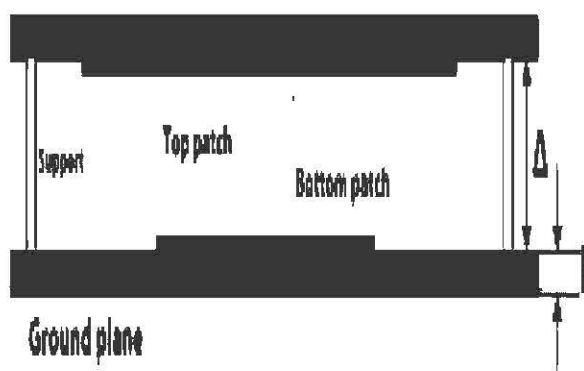


Figure 1. 21 : Antenne micro-ruban différentielle [11].

En 2013, Zhang a proposé un dispositif pour récupérer l'énergie en utilisant une antenne ultra large bande. Le système est composé d'une antenne dipôle à large bande, un filtre passe-bas micro-ondes et un circuit redresseur doubleur utilisant des diodes Schottky comme éléments de redressement [12]. Auparavant, quelques-unes des Rectennas à large bande ont été étudiées entre 1,7 et 2,5 GHz. L'originalité de ce travail réside dans la conception de Rectenna à large bande qui peut récolter la puissance radiofréquence (RF) ambiante de 1,7 à 2,5 GHz (Figure 1.22). Dans ce système, un nouveau dipôle transversal à large bande est conçu et utilisé pour atteindre une large bande passante à double polarisation (Figure 1.23).

Les caractéristiques de la Rectenna proposée dans la gamme de fréquences désirée sont étudiées et testées pour des densités de puissance d'entrée faibles de 5 à 200 $\mu W / cm^2$. Les résultats démontrent que l'efficacité de conversion maximale de

cette Rectenna est de 57% autour de 1,7 GHz et de plus de 20% sur la large bande d'intérêt pour la densité de puissance incidente de $120 \mu\text{W} / \text{cm}^2$. Il est à noter que l'adaptation d'impédance est l'un des principaux facteurs affectant l'efficacité de conversion d'énergie de la Rectenna. Cette Rectenna à large bande offre un grand potentiel pour récolter de l'énergie sans fil dans les bandes GSM / 3G / 4G et ISM 2,4 GHz [12].

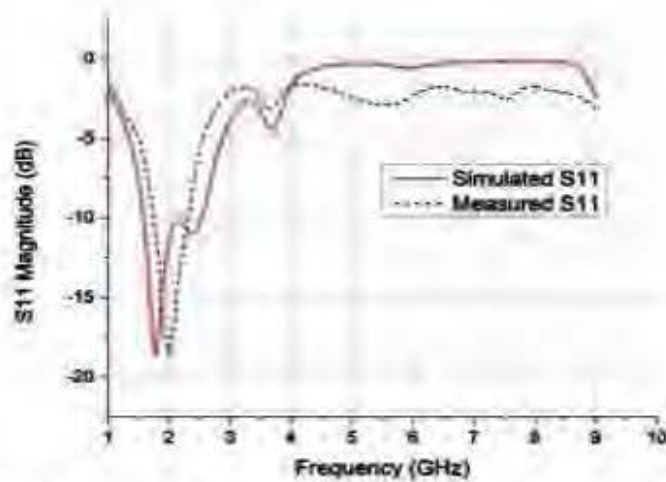


Figure 1. 22 : Bande de travail de l'antenne proposée dans [12].



Figure 1. 23: L'antenne et le filtre proposée [12].

Dans [13], une Rectenna à polarisation circulaire (CP) à large bande a été proposée pour la transmission d'énergie hyperfréquence à 4,2-7,6 GHz. L'antenne est constituée d'un déphaseur Schiffman standard et d'une paire d'antennes à fentes polarisées linéairement, positionnées orthogonalement (Figure 1.24). Le circuit redresseur est composé d'une diode de détection Schottky (HSMS-2862), d'un filtre passe-bas, d'une charge résistance, et d'un condensateur d'ondulation. Une tension continue de sortie de 1,98 V aux bornes d'une résistance de 680 Ohm et une efficacité de conversion maximale de 81,6% ont été mesurées lorsque la puissance micro-ondes de 34 dBm a été transmise à 5,6 GHz sur une distance de 50 cm.

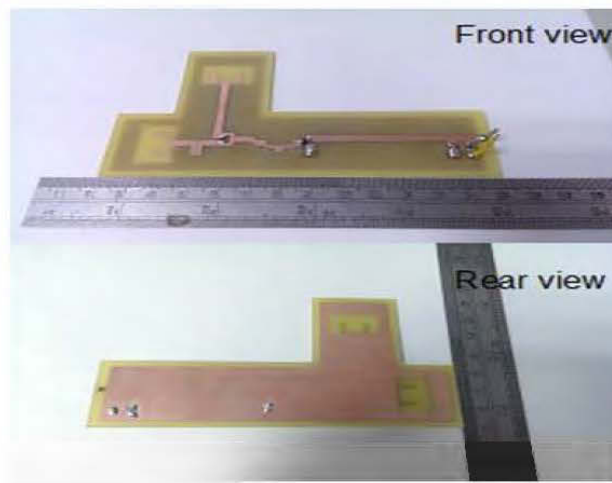


Figure 1. 24: L'antenne et son circuit de redressement [13].

Des cellules FSS ont été utilisées à la place des circuits d'adaptation qui sont efficaces mais nécessitent une surface supplémentaire. Les FSS utilisées dans cette conception de Rectenna fournissent une adaptation d'impédance exceptionnelle, produisant moins de perte de rendement et une efficacité RF-à-DC améliorée (Figure 1.25).

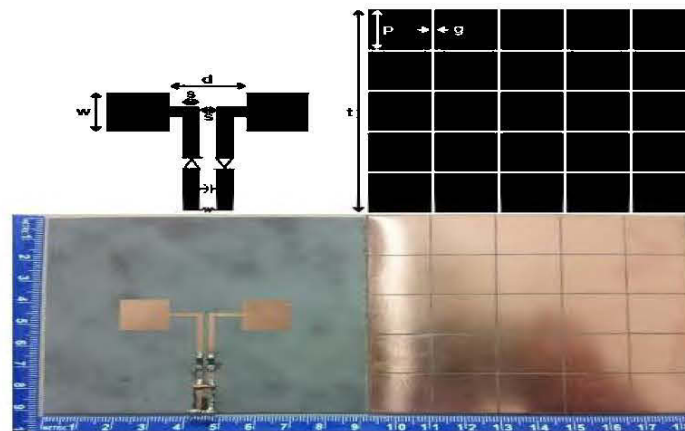


Figure 1. 25: Rectenna-FSS [14].

La Rectenna a été conçue pour fonctionner à la fréquence centrale de 2,45 GHz avec une bande passante de 2,44 à 2,54 GHz. Cette gamme de fréquence a été choisie en raison de la quantité importante d'énergie micro-ondes ambiante rayonnée dans la Bande ISM de 2.4 (Figure. 1.26).

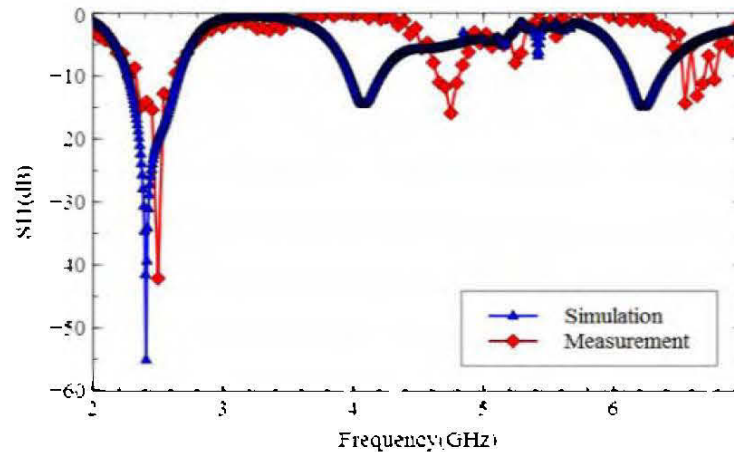


Figure 1. 26: Les pertes de retour de la Rectenna [14].

L'efficacité de conversion optimale de 79% a été obtenue en utilisant une résistance de 100 Ohm comme montrée dans la figure 1.27.

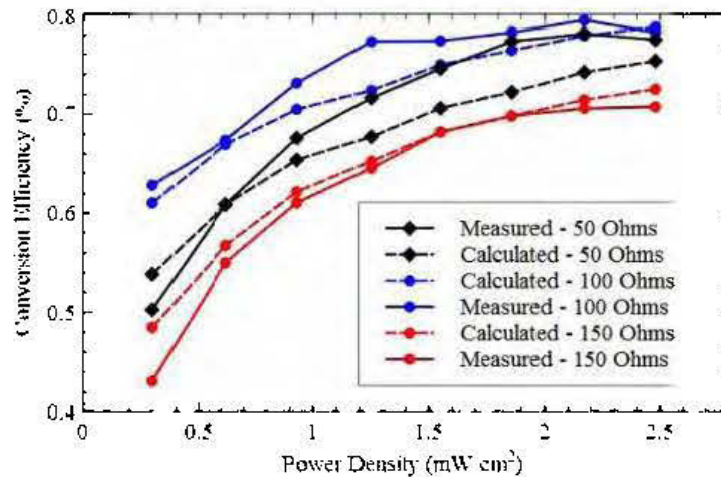


Figure 1. 27: Efficacité de conversion en fonction de la densité de puissance [14].

L'avantage de l'utilisation de la FSS à la place d'un circuit d'adaptation habituel réduit la surface de la Rectenna tout en fournissant une adaptation améliorée. Cette adaptation améliorée permet d'atteindre une grande efficacité de conversion RF-DC. L'efficacité de conversion était de 79% pour une résistance de 100 Ohm avec une tension de sortie maximale de 4,13 V.

L'antenne micro-mban alimentée en L avec deux ports est proposés dans [3]. Elle est constituée de deux antennes empilées dos à dos avec des plans de masses adjacents (Figure 1.28). Le patch est suspendu sur le sol et supporté par le superstrat. Cette antenne fonctionne en trois bandes de fréquence : GSM-900, GSM-1800, et UMTS-2100.

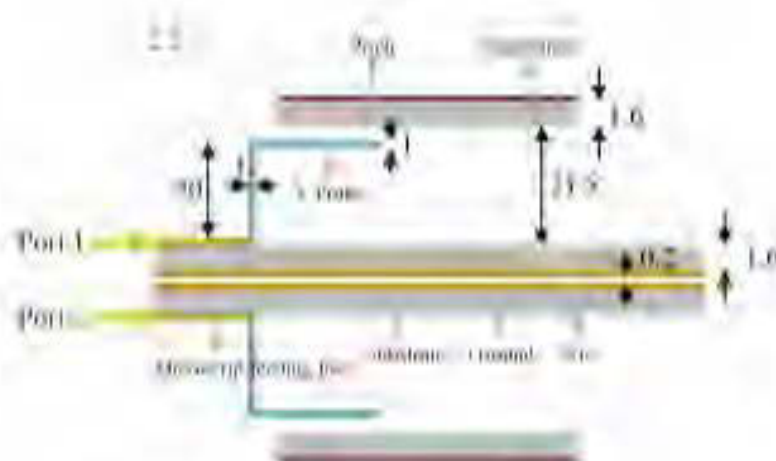


Figure 1.28: L'antenne alimentée en L [3].

Le redresseur à trois bandes GSM-900, GSM-1800 et UMTS-2100 est illustré dans la Figure 1.29. Un redresseur avec une seule diode série a été sélectionné pour son bon rendement RF-DC aux puissances d'entrée très faibles.

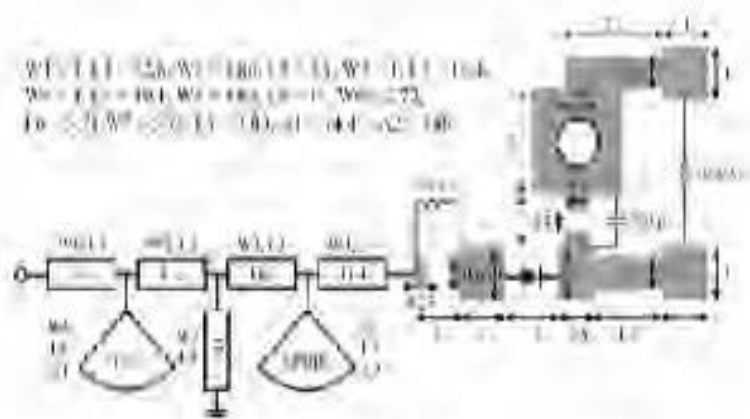


Figure 1.29: Rectificateur à trois bandes [3].

Pour cette simple rectification à double port, un combineur DC a été adopté où chaque port d'antenne est connecté au redresseur à triple bande et les sorties du redresseur sont simplement combinées en série pour doubler la tension de sortie.

L'efficacité RF-DC mesurée et la tension continue de sortie du Rectenna par rapport à la densité de puissance par chaque port sont représentées dans la figure 1.30. Le rendement est supérieur à 40% et la tension de sortie est supérieure à 600 mV quand la densité de puissance est supérieure à 500 $\mu\text{W}/\text{m}^2$. Même pour une densité de puissance faible de 60 $\mu\text{W}/\text{m}^2$, l'efficacité est égale à 20% et la tension de sortie est 140 mV.

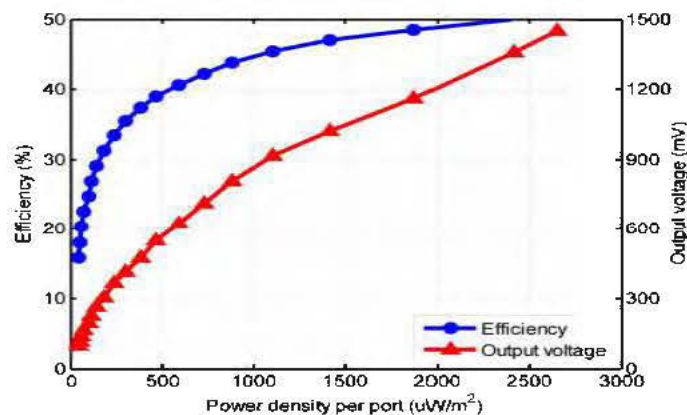


Figure 1. 30: Efficacité en fonction de la densité de puissance [3].

La conception d'une Rectenna à pixels multiport pour la récupération d'énergie radiofréquence (RF) ambiante a été présentée dans [15]. Le système consiste en une antenne pixel à trois ports optimisés et un redresseur à trois ports avec une combinaison en courant continu. La conception de l'antenne pixel à trois ports a été introduite en tant qu'un problème d'optimisation binaire avec une fonction objective liée à la puissance RF récoltée dans la bande GSM-1800. L'optimisation de l'antenne pixel à trois ports est obtenue en utilisant l'optimisation booléenne exhaustive successive. L'objectif est de faire l'optimisation d'une antenne pour recevoir un maximum d'énergie dans une direction donnée.

L'antenne pixel à trois ports est constituée d'une grille rectangulaire de 15×5 pixels carrés, sa géométrie et ses dimensions sont illustrées dans la figure 1.31. Elle comporte trois ports alimentés par des lignes micro-ruban et chaque pixel peut se connecter à ses

voisins. Il existe $Q = 130$ fils possibles indiqués par les petits carrés blancs sur la Figure 31. Il y a au total 2^Q combinaisons possibles et chaque combinaison produit des caractéristiques d'antenne différentes telles que l'impédance d'antenne et le diagramme de rayonnement. L'objectif est d'évaluer les différentes caractéristiques d'antenne possibles pour trouver la configuration optimale pour la récupération d'énergie RF.

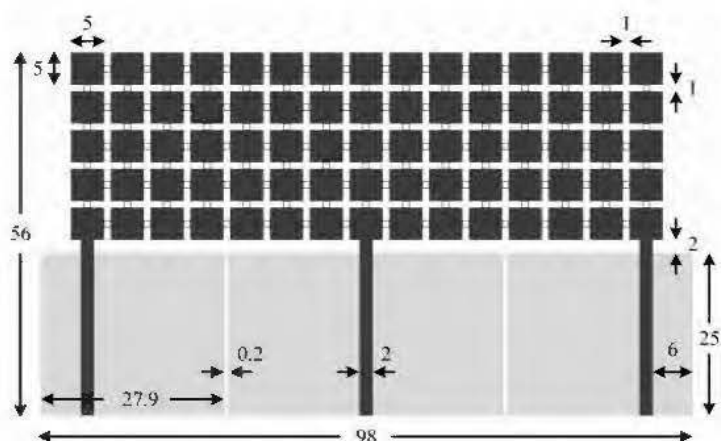


Figure 1. 31: Structure finale de l'antenne optimisée [15].

La structure finale de l'antenne optimisée est illustrée dans la figure 1.32.



Figure 1. 32: L'antenne optimisée [15].

L'efficacité RF-DC mesurée du redresseur en fonction du niveau de la puissance d'entrée RF aux différentes fréquences est illustrée dans la figure 1.35. Il est à noter que le rendement augmente avec la puissance RF d'entrée jusqu'à la valeur de 5dBm. Cependant, l'efficacité diminue à cause de l'effet de dégradation de la diode. L'efficacité aux différents échantillons de fréquence dans la bande GSM-1800 est presque la même lorsque la puissance d'entrée est faible, ce qui fournit une réponse en fréquence plate dans la bande.

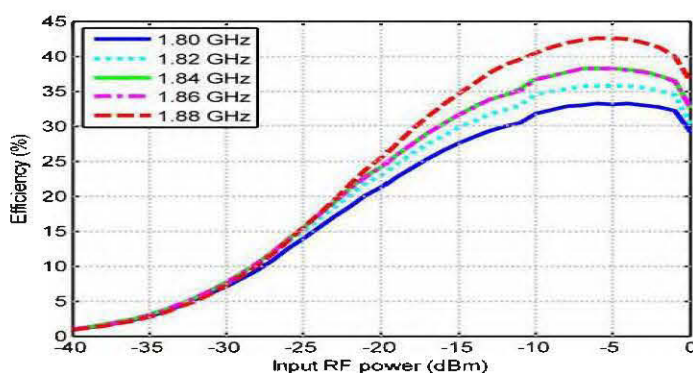


Figure 1. 35: L'efficacité RF-DC mesurée du redresseur [15].

Finalement, pour augmenter la tension de sortie, un combineur DC a été développé pour les trois redresseurs (Figure 1.36).

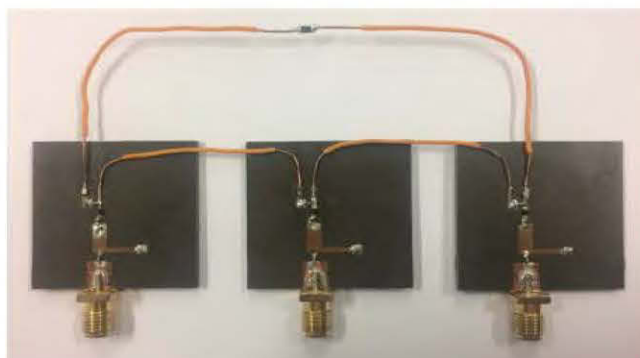


Figure 1. 36: Combineur DC [15].

Dans [16], des cellules FSS ont été spécialement conçues et optimisées pour la récupération d'énergie RF ambiante. La géométrie des cellules unitaires incorpore des fonctions de canalisation afin de combiner la puissance collectée à partir de plusieurs cellules unitaires, et la transférer au redresseur, pour avoir un fonctionnement efficace dans des conditions de faible puissance. Des traces de canalisation ont été ajoutées en tant que caractéristique de conception qui donnent la possibilité de transférer l'énergie absorbée par FSS à la charge et aussi, permettre à un nombre quelconque de cellules élémentaires dans une rangée d'être connecté l'une à l'autre. La résistance localisée a été stratégiquement connectée entre les traces de canalisation, permettant la connexion parallèle des cellules unitaires. Un modèle 3D de la cellule unité FSS optimisée est représenté dans la figure 1.37.

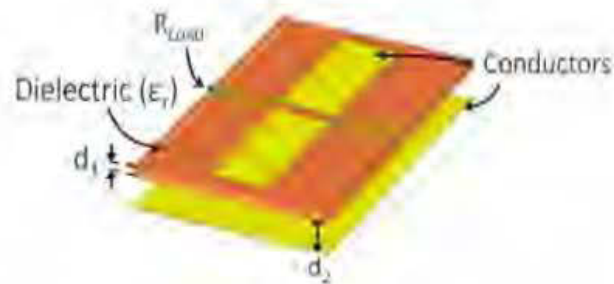


Figure 1. 37: FSS proposée dans [16].

Le pourcentage de la puissance incidente collectée par le FSS est illustré dans la figure 1.38 (a), et la distribution de la puissance acceptée est présentée dans la figure 1.38 (b). Les résultats de simulation de la structure périodique ont révélé que 98.5% de la puissance incidente est absorbée par la structure FSS à 2.45 GHz, 97% est absorbé par la résistance localisée, 1.1% est absorbé par le substrat diélectrique et 0.4% est dissipé comme des pertes métalliques.

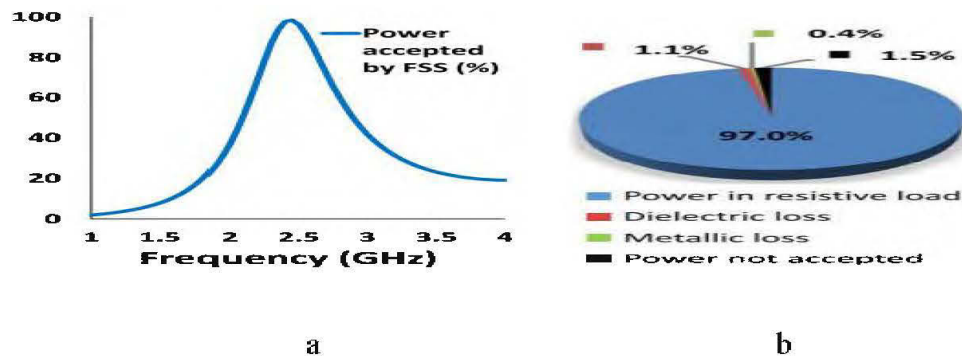


Figure 1.38: Caractéristiques d'absorption du FSS [16].

Les redresseurs demi-onde (une seule diode) sont limités à l'utilisation d'un demi-cycle du signal alternatif. D'un autre côté, le redresseur à pont de diodes réalise une rectification pleine onde en exploitant les deux demi-cycles du signal alternatif, ce qui peut améliorer l'efficacité. La rectification avec un pont de diode est moins utilisée que la demi-onde, ceci est principalement dû au fait que deux diodes doivent être activées pour chaque demi-cycle, ce qui le rend plus adapté aux applications de puissance élevée.

La structure FSS proposée répond à la limite de puissance d'entrée élevée. Les cellules unitaires multiples d'une rangée peuvent être regroupées et alimenter le redresseur pour obtenir une efficacité maximale. La figure 1.39 montre le schéma sous le logiciel ADS du circuit de redressement avec un pont de diode. C1 et C2 sont des condensateurs pour bloquer le courant continu. C3, L1 et L2 sont des composants de circuit d'adaptation. R1 est la résistance de charge de sortie et C4 est le condensateur de lissage pour minimiser les ondulations de sortie.

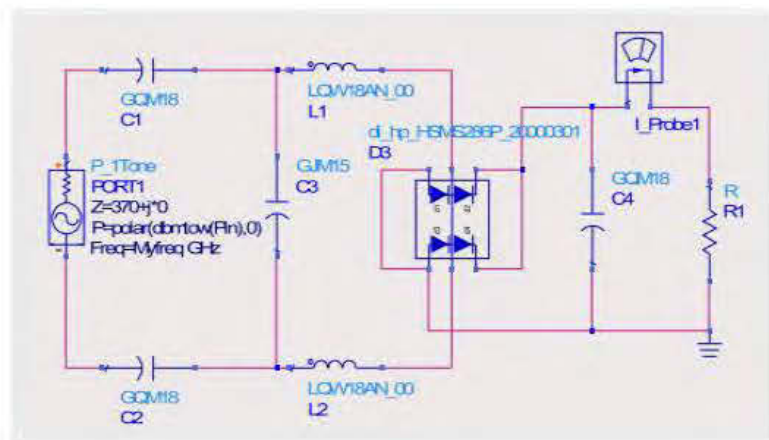


Figure 1. 39: Rectificateur à pont de diode [16].

La figure 1.40 montre l'efficacité de redressement en fonction de la fréquence à divers niveaux de puissance d'entrée. On peut remarquer que l'efficacité augmente régulièrement avec une puissance d'entrée plus élevée. De ce fait, il est très important de noter que cette tendance ne se poursuit pas après 15 dBm parce que le redresseur atteint son efficacité maximale. Pour des puissances d'entrée supérieures à 15 dBm, l'adaptation d'impédance du redresseur se détériore et le rendement devient nettement inférieur.

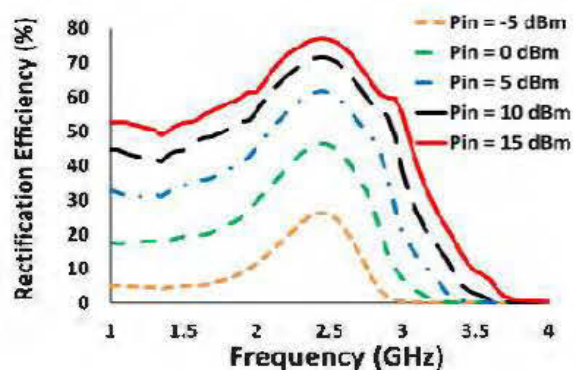


Figure 1. 40: Efficacité de redressement en fonction de la fréquence [16].

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, le principe de base d'une Rectenna a été présentée et discutée. Plusieurs architectures de redresseurs ont été aussi présentés. Le redresseur avec une diode série était le plus adapté pour les applications de faible puissance. L'étude sur les niveaux de la densité de puissance RF présentée dans l'environnement urbain a permis de mettre en évidence les bandes de fréquences prédominantes telles que le GSM900, le GSM1800, WIMAX et le Wi-Fi.

Dans ce chapitre, nous avons également étudié la conception d'un réseau d'adaptation d'impédance. On a expliqué les défis qu'on trouve lors de la conception d'un réseau d'adaptation, ainsi que les différents types d'adaptateur qu'on peut utiliser. Un état de l'art sur les Rectennas utilisées dans la récupération d'énergie a été effectuée, montrant les différentes techniques rapportées dans la littérature pour augmenter l'efficacité de conversion et la tension de sortie aux faibles puissances.

CHAPITRE 2

RECTENNA MONO-BANDE AVEC UN RESEAU HEXAGONALE POUR LA RECUPERATION D'ENERGIE

2.1 Introduction :

Ces dernières années, le nombre d'appareils connectés à Internet a considérablement augmenté. Cela entraîne que plus de capteurs et de circuits électroniques seront utilisés presque partout, ce qui posera un grand défi en termes d'alimentation électrique [1]. En fait, la récupération d'énergie est une solution clé pour résoudre le problème de la charge de batterie, en utilisant une Rectenna pour convertir l'énergie ambiante RF telle que Wifi, WiMax en énergie continue. Cependant, l'inconvénient principale de la récupération de l'énergie radiofréquence est la faible densité de puissance RF collectée, qui conduit à un faible rendement RF-DC [2].

Plusieurs techniques ont été rapportées dans la littérature pour ressourdre ce problème. Parmi ces techniques, on trouve l'utilisation des antennes avec un gain élevé permettant d'absorber une grande quantité de la puissance radiofréquence [3]. Concernant l'optimisation des réseaux d'antennes, les métamatériaux sont aussi considérés parmi les techniques utilisées pour augmenter le gain de la structure.

Dans ce chapitre, nous présentons une Rectenna à gain élevé pour les applications de la récupération d'énergie, constituée d'une antenne patch à substrat multicouche et alimentée par couplage électromagnétique pour qu'elle rayonne à la fréquence 5,8 GHz. Pour améliorer le gain de cette antenne, un FSS est utilisée, et le gain final de la structure (antenne + FSS) est de 13.1 dBi. Un redresseur destiné à récupérer l'énergie RF dans la bande Wi-Fi 5,8 GHz est conçu avec une seule diode Schottky, servant comme un élément de redressement. Le redresseur présente un bon rendement de conversion de 40% à -3 dBm. Après la conception de la Rectenna, nous proposons un réseau hexagonal permettant de récupérer l'énergie à 360

degrés. Cette technique est utilisée pour la première fois dans les applications de la récupération d'énergie. En utilisant un combineur de tension continu pour sommer les tensions de sortie de chaque redresseur. Cette structure permettra de multiplier la tension de sortie de la Rectenna par un facteur de 6.

2.2 Conception de l'antenne

2.2.1 Principe de fonctionnement d'une antenne patch avec une alimentation par couplage EM.

En 1985, Pozar [17] a proposé une nouvelle technique d'alimentation pour les antennes patch basée sur le concept d'alimentation par couplage afin d'obtenir une large bande passante. Le couplage avec fente est une méthode indirecte d'alimentation du patch. La fente a pour rôle de coupler l'antenne patch avec la ligne d'alimentation. La structure de base d'une antenne avec une ouverture de couplage est illustrée dans la figure 2.1.

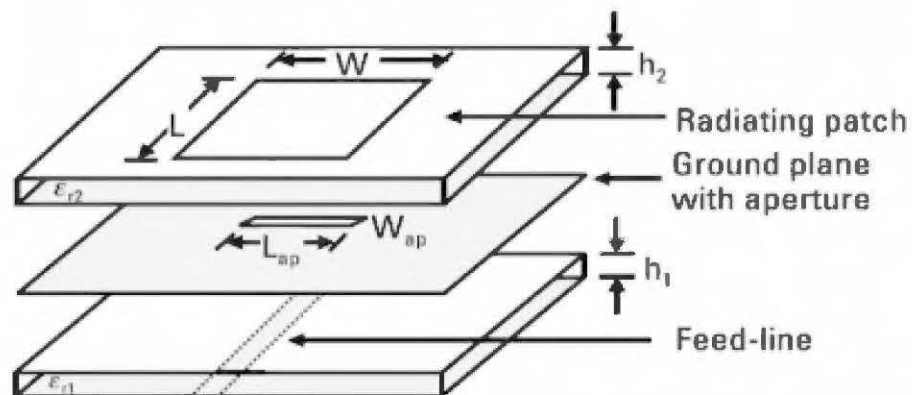


Figure 2. 1 : Structure de base d'une antenne avec une ouverture de couplage [17].

La figure 2.1 montre un aperçu de la conception d'une antenne micro-ruban avec la technique de couplage. De cette figure, on peut voir deux substrats, un pour la ligne d'alimentation et l'autre pour l'élément rayonnement (le patch). Une fente qui se trouve

sous le deuxième substrat est formée au centre du plan de masse et la ligne d'alimentation, tel que comme illustré dans la figure 2.1. Ces types d'antennes sont très populaires, car les patchs et les fentes peuvent avoir n'importe quelle forme, ce qui améliore les performances de l'antenne patch [17].

Le bon choix des paramètres dans ce types d'antenne est primordiale, car il affecte considérablement les performances de l'antenne. La permittivité du substrat de l'antenne affecte principalement la largeur de la bande et l'efficacité du rayonnement de l'antenne (une permittivité plus faible donne une largeur de bande plus grande), de plus, son épaisseur affecte la largeur de bande et le niveau de couplage [17]. Un substrat plus épais donne une largeur de bande plus large, mais moins de couplage pour une taille d'ouverture donnée. De ce fait, le niveau de couplage est principalement déterminé par la longueur et la largeur de la fente de couplage. La fente ne doit pas dépasser la taille requise pour l'adaptation d'impédance [17]. La fréquence de résonance est déterminée par la longueur du patch.

2.2.2 Etat de l'art :

Dans cette section, nous présentons des travaux effectués sur les antennes patch avec alimentation par couplage.

Un exemple d'une antenne avec couplage par fente est présenté dans la figure 2.2 [18]. En Utilisant une structure de substrat multicouche avec une alimentation couplée, une antenne patch rectangulaire rayonnante dans la bande de 1,9 GHz est conçue. Cette configuration d'antenne utilise un transformateur quart d'onde pour améliorer l'adaptation entre la ligne de transmission et l'antenne patch.



Figure 2. 2 : Antenne patch avec alimentation par couplage [18].

Les résultats indiquent que l'antenne atteint une bande passante de 21% avec un gain de 9.4 dBi.

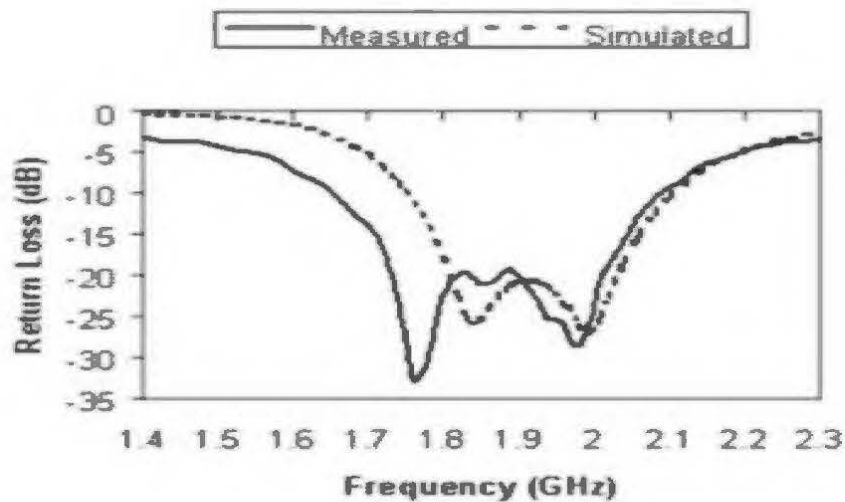


Figure 2.3: Coefficient de réflexion de l'antenne [18].

La structure présentée dans la figure 2.4 est une antenne patch circulaire alimentée par couplage [19]. Cette antenne a deux ports d'alimentation, chaque port a une fente de couplage, pour générer deux différentes polarisations. Elle offre un gain de 7.4 dBi et

une largeur de bande de 30% à la fréquence 5.8 GHz pour les deux ports, avec une bonne isolation (figure 2.5).

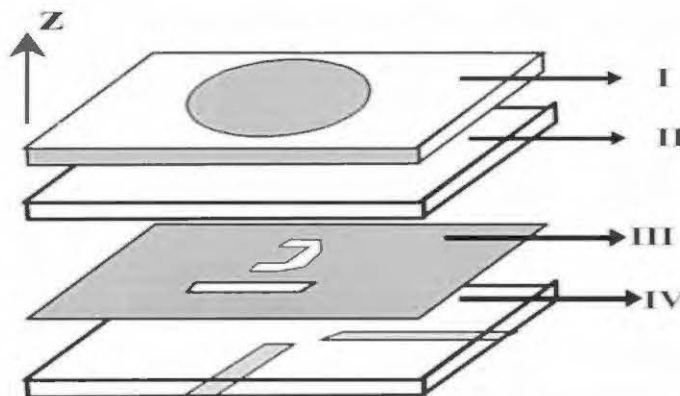


Figure 2. 4: Structure de l'antenne proposée dans [19].

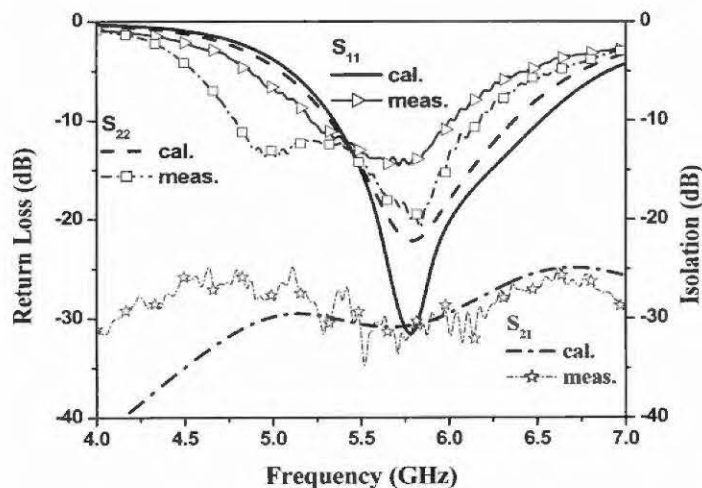


Figure 2. 5: Coefficient de réflexion de l'antenne [19].

2.2.3 L'antenne proposée :

L'antenne représentée dans la figure 2.6 est conçue pour fonctionner à la fréquence 5,8 GHz. La première couche (substrat d'alimentation) est un substrat RT / Duroid 5880 de constante diélectrique 2,2 et d'épaisseur de 0,787mm. Cette antenne est alimentée par une ligne quarte d'onde sur la face inférieure, la masse et la fente de

couplage sont placées dans l'autre face de l'antenne. Cette couche est suivie d'une mousse de 4 mm d'épaisseur à faible constante diélectrique (égale à 1,07). Sur le dessus de la mousse, une mince couche de substrat RT / Duroid avec une constante diélectrique de 2,2 et une épaisseur de 0,127 mm est utilisée pour supporter l'antenne patch gravée. La structure de l'antenne est semblable à celle proposée dans [18].

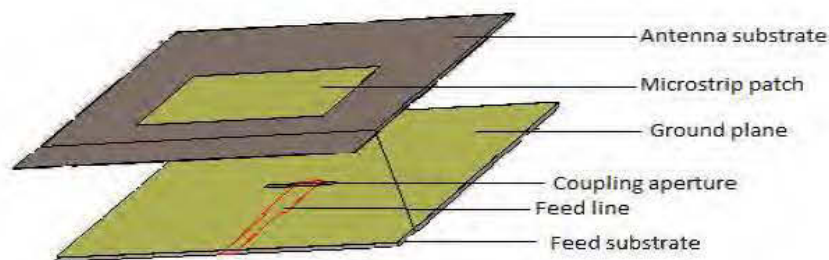


Figure 2. 6: L'antenne proposée.

La figure 2.7 montre les dimensions de l'antenne conçue.

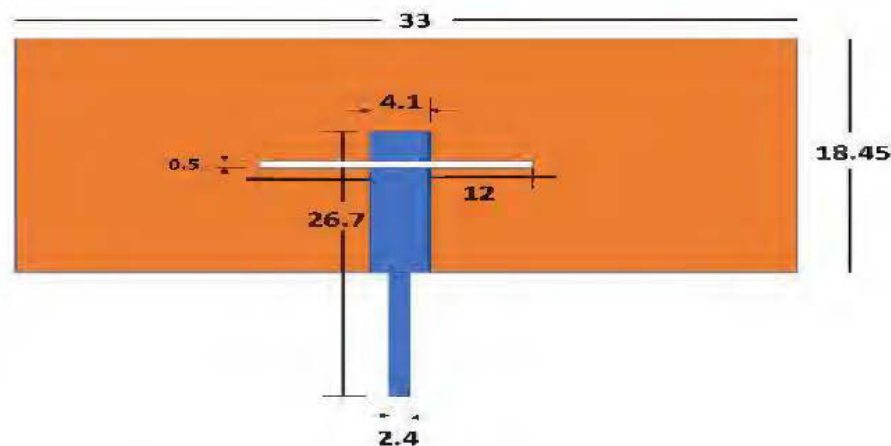


Figure 2. 7 : Vue de dessus de l'antenne proposé.

2.2.4 Interprétation des résultats

La figure 2.8 montre la courbe du coefficient de réflexion de l'antenne conçue. On remarque une bande passante d'environ 1 GHz avec une bonne adaptation d'impédance à la fréquence de 5.8GHz (-27 dB).

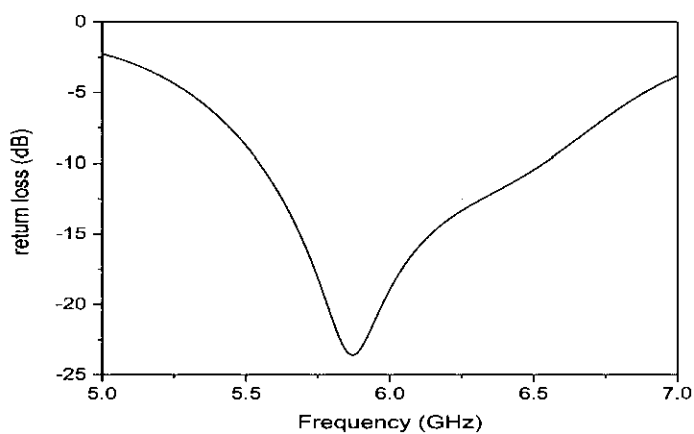


Figure 2. 8: Coefficient de réflexion de l'antenne conçue.

Diagramme de rayonnement et gain de l'antenne :

Le diagramme de rayonnement dans le plan E (figure 2.9) montre un gain directif de l'antenne patch de 10.2 dBi, avec une largeur angulaire du lobe principale de 60 degrés.

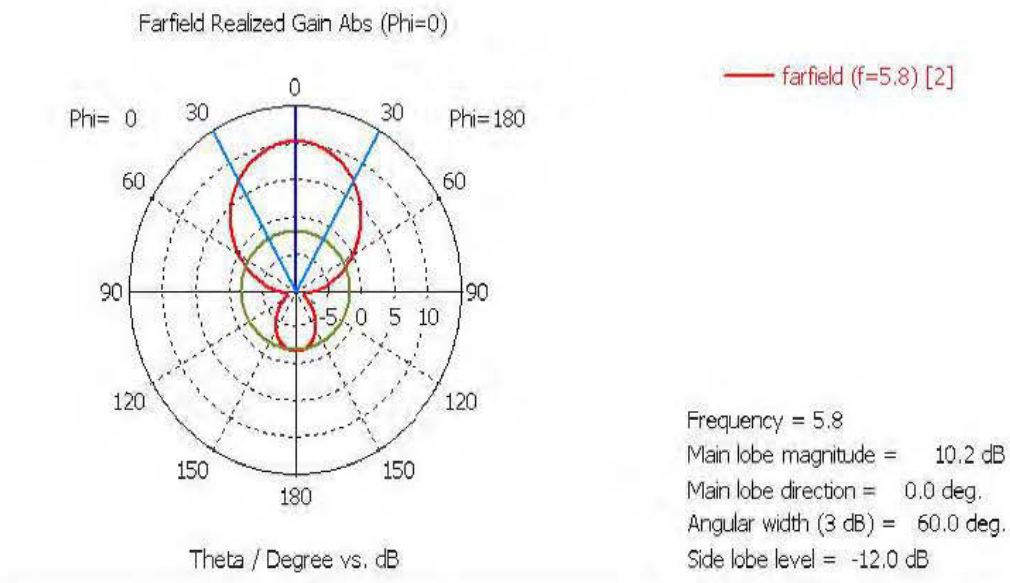


Figure 2. 9: Diagramme de rayonnement en plan E.

Le diagramme de rayonnement dans le plan H (figure 2.10) montre aussi un gain élevé de l'antenne de 10.2 dBi, avec une largeur angulaire du lobe principal de 52.6 degrés.



Figure 2. 10: Diagramme de rayonnement en plan H.

La représentation en 3D (figure 2.11) montre le diagramme de rayonnement de l'antenne.

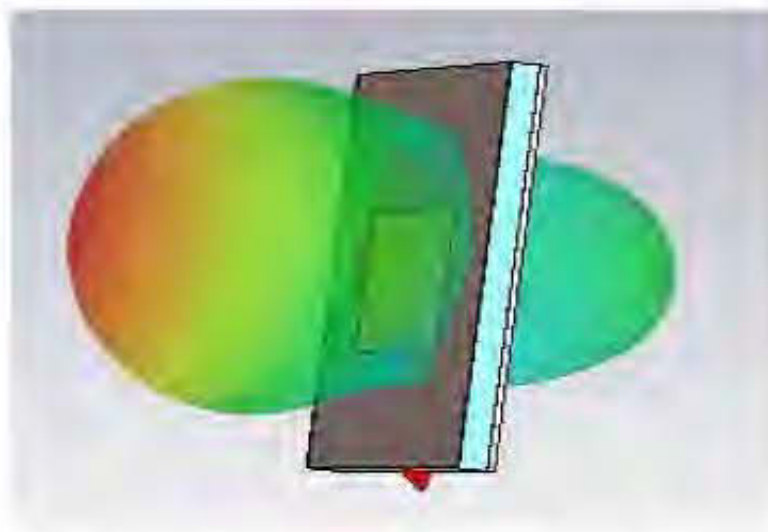


Figure 2.11: Diagramme de rayonnement en 3D.

La figure 2.12 montre la réalisation de premier prototype de l'antenne.



Figure 2.12: Photo de l'antenne réalisée.

La figure 2.13 montre le coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne. La comparaison entre les résultats de mesure de simulation montre une bonne concordance entre les deux.

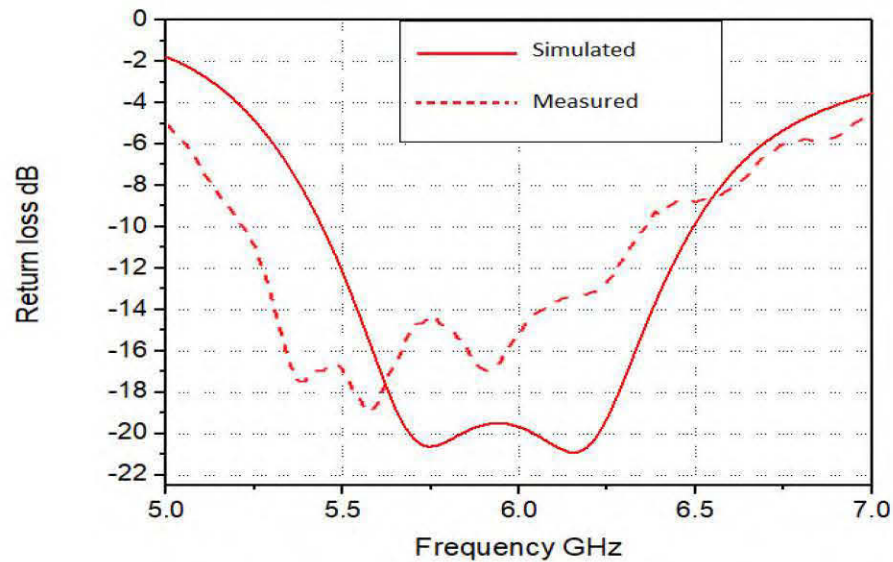


Figure 2. 13: Coefficient de réflexion simulé et mesuré de l'antenne

Cette antenne offre un gain très élevé par rapport aux antennes patch conventionnelles. Afin d'augmenter davantage son gain, on va ajouter une structure FSS.

2.2.5 Structure antenne + FSS

La structure de FSS utilisée dans ce travail est présentée dans la figure 2.14 [20]. Il s'agit d'une structure Dumbell conventionnelle, où les cellules ont été optimisées pour avoir le maximum de gain possible de l'antenne.

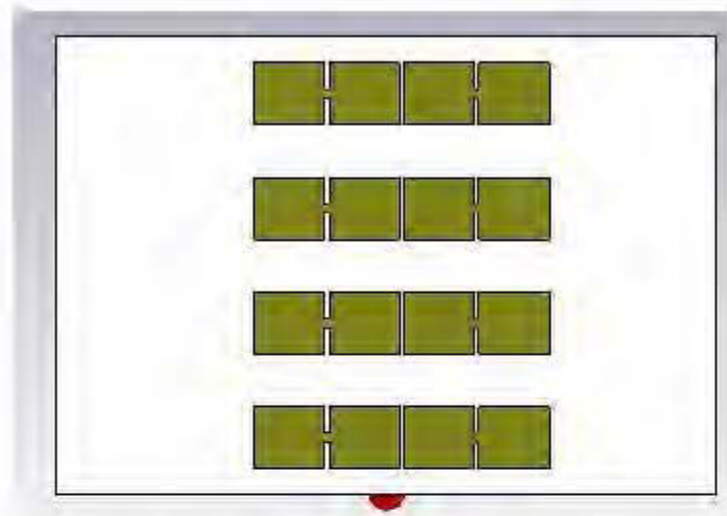


Figure 2. 14: Structure du FSS.

La structure de l'antenne + FSS est montrée dans la figure 2.15.

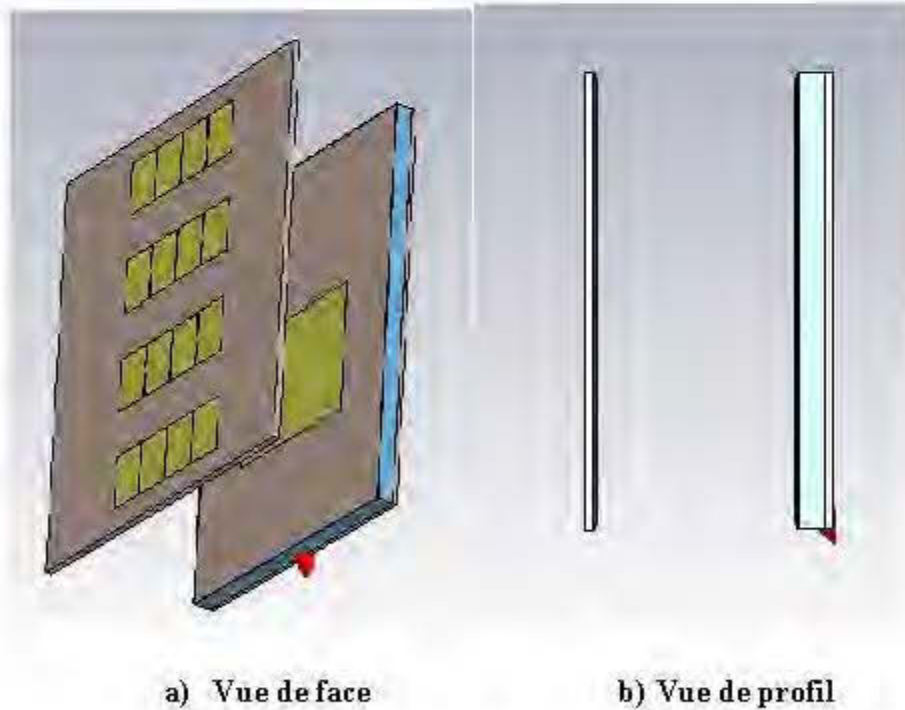


Figure 2. 15: Structure de l'antenne avec FSS.

La distance entre le FSS et l'antenne est un factor très important pour avoir une bonne adaptation avec une bonne augmentation du gain. Pour cela, cette distance a été bien optimisée, et la distance optimale est obtenue à 25 mm.

La figure 2.16 montre la courbe du coefficient de réflexion de la nouvelle structure (antenne +FSS). Il est montré qu'une bande passante d'environ 350 MHz avec une bonne adaptation d'impédance à la fréquence de 5.8 GHz (-22 dB).

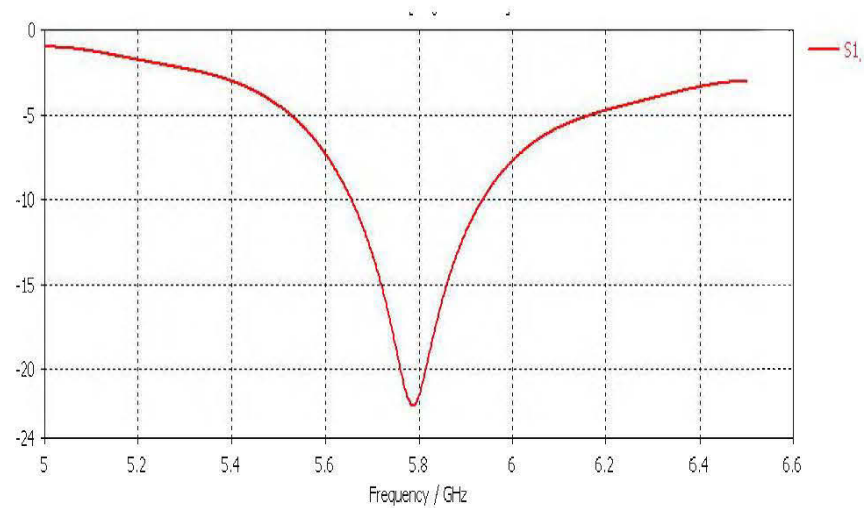


Figure 2. 16: Coefficient de réflexion de l'antenne proposée avec FSS.

Le diagramme de rayonnement de la structure (FSS + antenne) dans le plan E est illustrée dans la figure 2.17. On remarque que le gain de la structure est augmenté à la valeur de 13.1 dBi, avec une largeur angulaire du lobe principal de l'ordre de 35 degrés, ce qui représente un diagramme très directionnel.

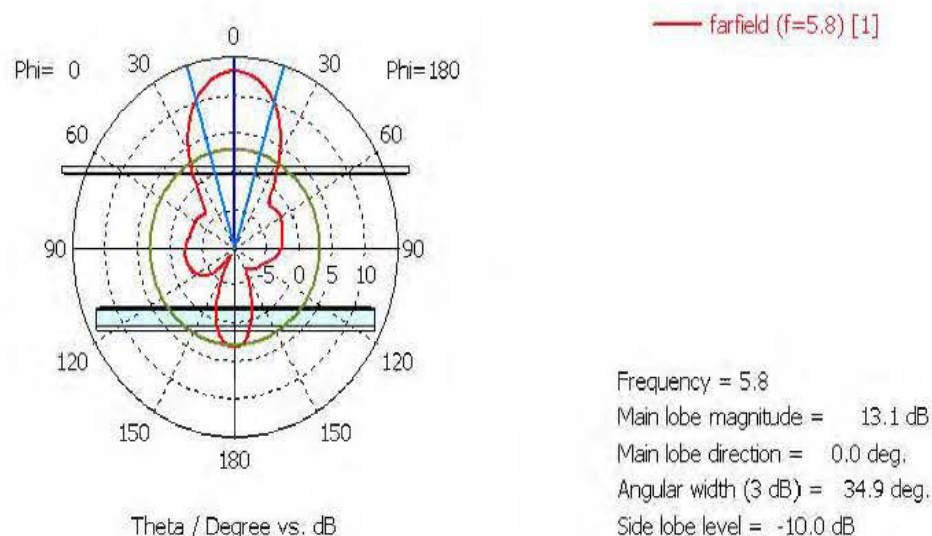


Figure 2. 17: Diagramme de rayonnement dans le plan E de l'antenne avec FSS.

Le diagramme de rayonnement dans le plan H (figure 2.18) montre aussi un gain élevé de l'antenne de 13.1 dBi, avec une largeur angulaire du lobe principal de 38.6 degrés.

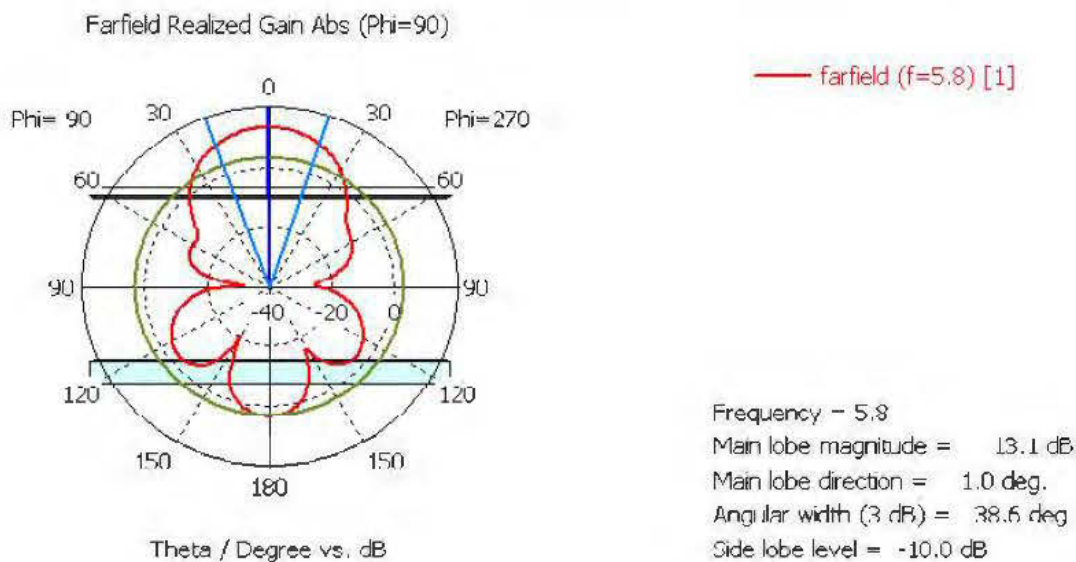


Figure 2. 18: Diagramme de rayonnement en plan H de l'antenne avec FSS.

La structure (antenne +FSS) fournit un diagramme de rayonnement très directionnel avec un gain très élevé de 13.1 dBi, qui est très utile pour les applications de la récupération d'énergie.

Le tableau 2.1 montre une comparaison de l'antenne proposée avec d'autres antennes rapportées dans la littérature :

Tableau 2. 1: Comparaison.

Antenne	Fréquence de fonctionnement (GHz)	Gain (dBi)
[21]	0.915	10.5
[22]	5.8	12.33
[23]	2.45	10.8
[24]	5.2	12
[25]	2.45	9.7
Ce travail	5.8	13.1

2.3 Conception d'un redresseur mono-bande pour la récupération d'énergie :

2.3.6 Architecture globale du redresseur :

La figure 2.19 montre l'architecture globale utilisée pour construire le redresseur. La puissance maximale est transférée à la charge si l'impédance complexe de la source est égale à l'impédance complexe conjuguée de la charge. Ce résultat est obtenu en insérant un réseau d'adaptation d'impédances entre l'antenne de réception et le redresseur. Le choix de la topologie du redresseur implique un compromis entre le niveau de la tension de sortie, la puissance incidente et l'efficacité de conversion RF-DC. Dans l'environnement ambiant, le niveau de la densité de puissance RF est généralement faible. Ainsi, le compromis optimal est la structure série, en effet, ce

redresseur (série) possède un seul seuil de déclenchement qui correspond à celui de son unique diode. Le filtre DC assure que seulement la puissance DC qui passe à la charge.

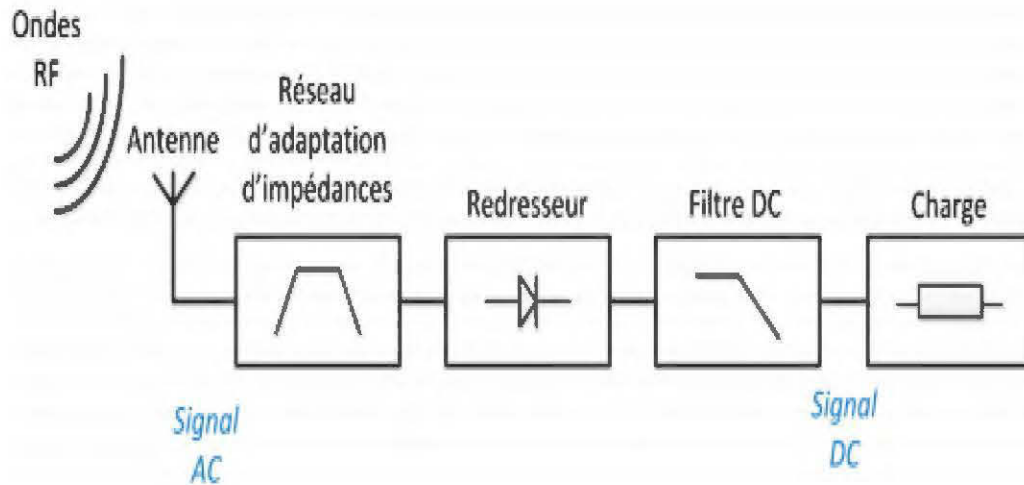


Figure 2. 19: Architecture globale utilisée pour construire le redresseur [4].

2.3.7 Méthode de conception du réseau d'adaptation d'impédance.

Pour un transfert maximal de puissance à la charge, il faut que l'impédance complexe de la source soit égale à l'impédance complexe conjuguée de la charge. On peut obtenir ce résultat en insérant un réseau d'adaptation d'impédances entre l'antenne de réception et le redresseur.

Le modèle électrique de l'antenne Rectenna est illustré dans la Figure 2.20. L'antenne de réception est modélisée par une simple résistance R_a . Le redresseur utilisé est le redresseur série associé à un filtre LC qui joue le rôle du filtre DC. Enfin, une résistance R_L est utilisée pour modéliser la charge.

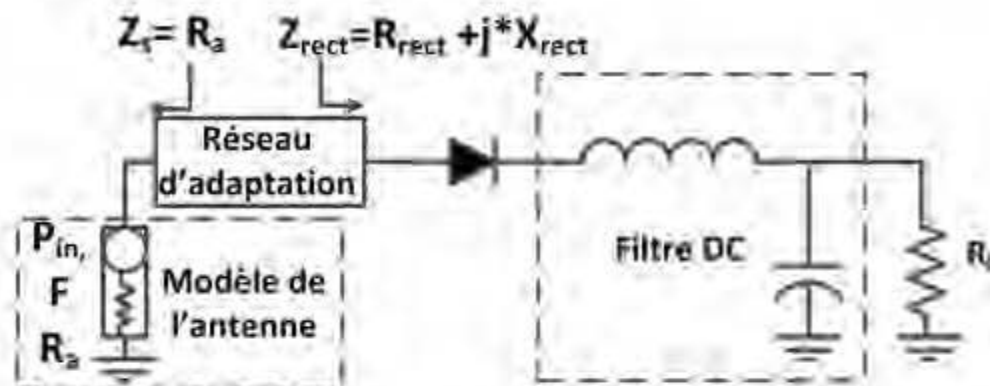


Figure 2. 20: Récupérateur d'énergie RF modélisé [4].

Pour concevoir le réseau d'adaptation d'impédances, il est tout d'abord nécessaire de déterminer l'impédance d'entrée du redresseur, Z_{rect} . La branche RF est simulée avec le logiciel ADS. Afin de considérer le comportement non-linéaire du redresseur, la méthode Harmonique-Balance du logiciel ADS (Advanced Design System de Keysight) a été utilisée.

L'impédance d'entrée du redresseur est obtenue à l'aide du logiciel ADS, avec l'utilisation de l'abaque de Smith, on a fait la conception du réseau d'adaptation. Le réseau d'adaptation utilisé dans ce mémoire est de forme L, qui est le plus utilisé dans les applications de la récupération d'énergie à cause de sa simplicité. Le réseau en forme L est composé de 2 éléments d'adaptation, ces éléments doivent être passifs comme des bobines, des capacités, des stubs.

Pour bien illustrer la méthode d'adaptation en utilisant l'abaque de Smith du logiciel ADS. Un exemple d'adaptation avec le réseau L est présenté dans la figure 2.21.

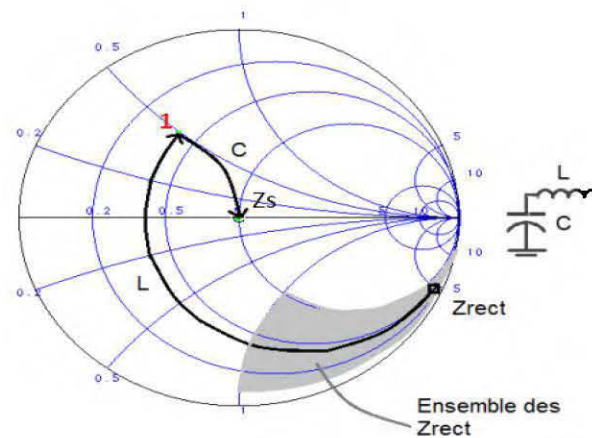


Figure 2. 21: Adaptation d'impédance avec le filtre en L.

Comme on l'a mentionné avant dans la partie adaptation (section 2.3.7), il faut que l'impédance complexe conjuguée de la source soit égale à l'impédance complexe de la charge. En réalité, l'impédance d'entrée de la source est toujours réelle et égale à 50 Ohm, donc pour bien adapter notre circuit, il faut que : $Z_{rect}=50$.

L'abaque de Smith a été utilisée sous ADS pour représenter l'impédance Z_{rect} , comme montré dans la figure 2.21. Notre but est de ramener l'impédance Z_{rect} au centre de l'abaque, qui représente la charge de la source 50 Ohm. De ce fait, nous avons utilisé une bobine et une capacité pour effectuer une bonne adaptation. À partir du point Z_{rect} dans l'abaque, on ajoute une bobine avec une valeur L qui va ramener la valeur de Z_{rect} au point 1. Pour ramener le point 1 au centre de l'abaque (adaptation), on utilise une capacité d'une valeur C. Pour les capacités en parallèle ou bien les bobines en parallèle, on peut les remplacer par des lignes micro-ondes.

2.3.8 L'architecture proposée :

Le redresseur proposé pour la récupération d'énergie RF dans la bande 5,8 GHz est illustré dans la Fig. 2.22. La diode Schottky Skyworks SMS7630 est utilisée en raison de sa faible tension de seuil. Le substrat est Rogers RT / Duroid 5880 (dont

la constante diélectrique est de 2,2) avec une épaisseur de 0,787 mm. Un condensateur avec une valeur de 100 pF est utilisé comme un filtre passe-bas afin de garantir que seul le courant continu passe à la charge de 3 k. Le stub (Lstub2) et la bobine sont utilisés pour l'adaptation d'impédance. Le redresseur est conçu à l'aide du logiciel ADS. Les dimensions du redresseur ont été conçues et optimisées pour obtenir une bonne adaptation d'impédance sous la contrainte de la faible puissance d'entrée de -10 dBm ($L_{line1} = 5$ mm, $L_{line2} = 3$ mm, $L_{stub1} = 3,9$ mm, $L_{stub2} = 6,5$ mm, $L_1 = 2,50$ nH et la largeur des lignes de transmission est $W = 2,38$ mm).

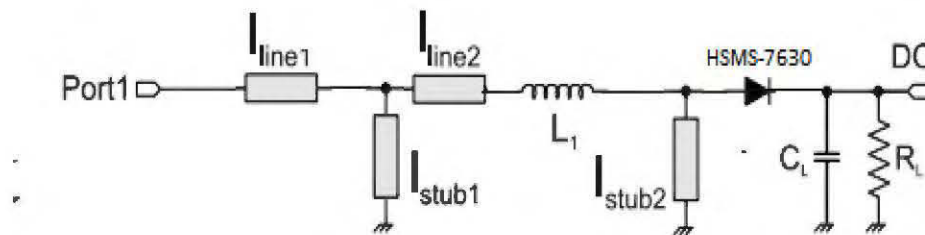


Figure 2. 22: Architecture du redresseur conçu.

2.3.9 Résultats et discussion :

Le coefficient de réflexion simulé S_{11} à -10 dBm de puissance RF d'entrée est montré dans la Fig. 2.23. On peut remarquer que le redresseur présente une bonne d'adaptation d'impédance à la fréquence 5,8 GHz.

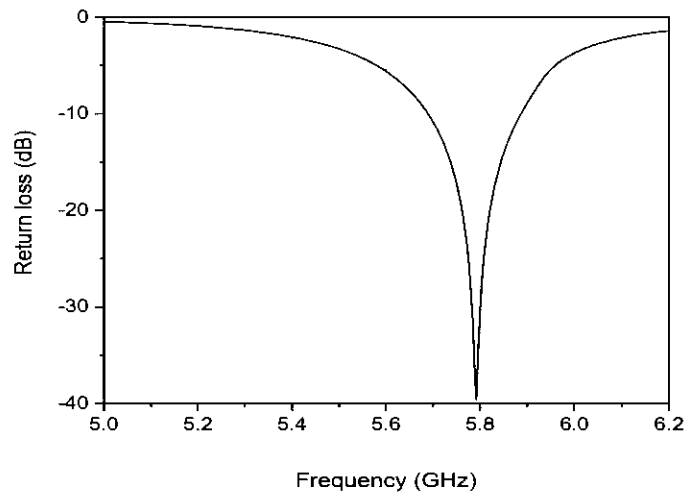


Figure 2. 23: Coefficient de réflexion du redresseur.

Le spectre simulé des signaux collecté sur la ligne d'entrée et de sortie (aux bornes de la charge) est montré dans la figure 2.24. Un signal d'une puissance incidente de -10 dBm, soit 0.1 mW, est introduit dans le circuit à la fréquence 5.8 GHz. On remarque que l'harmonique fondamentale de 5.8 GHz est la plus grande avec une valeur de -10 dBm dans le signal d'entrée avec une valeur très petite du signal continue (-170 dBm). A la sortie du redresseur, on remarque que le signal continue est le plus grand avec une augmentation de 170 dBm par rapport à l'entrée, ou tous les autres harmoniques sont atténués à la sortie à cause de l'effet du filtrage (condensateur).

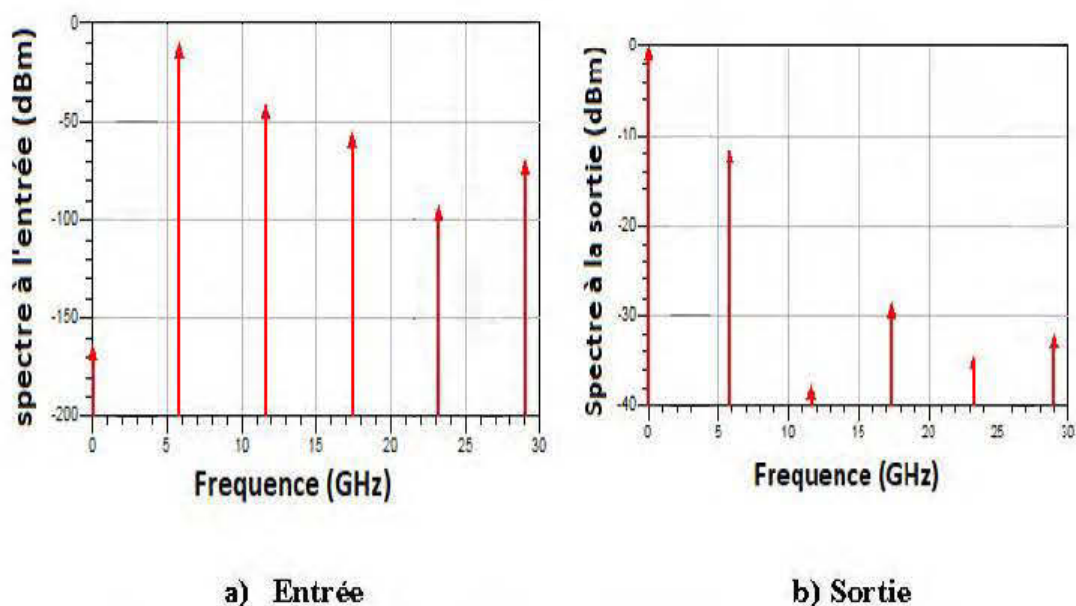


Figure 2. 24: Spectres simulés des signaux en entrée et en sortie.

L'efficacité de conversion RF-DC simulée du redresseur à la fréquence de 5,8 GHz par rapport à la puissance d'entrée est illustrée dans la Fig. 2.25. L'efficacité du redresseur est égale à 32% à -10 dBm, avec une efficacité maximale de 40% à -3 dBm, démontrant ainsi une bonne performance de rectification.

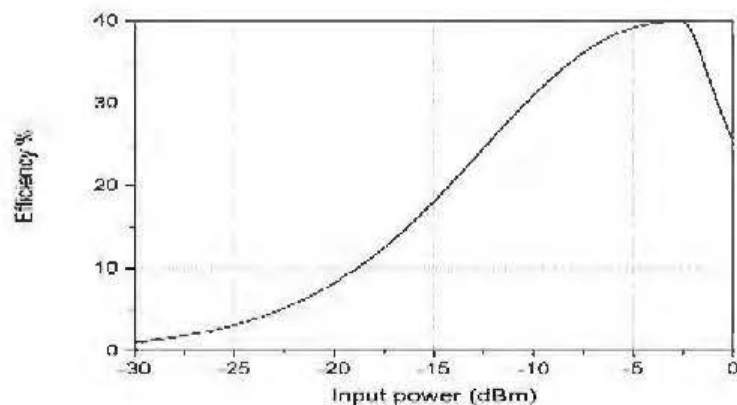


Figure 2. 25: L'efficacité de conversion RF-DC du redresseur en fonction de la puissance d'entrée.

La tension DC de sortie simulée à la fréquence 5,8 GHz par rapport à la puissance d'entrée est également illustrée à la figure 2.26. Pour une puissance d'entrée de -10 dBm, une tension continue de 0,3 V a été obtenue, tandis qu'une tension de crête de 0,9 V peut avoir lieu à -3 dBm.

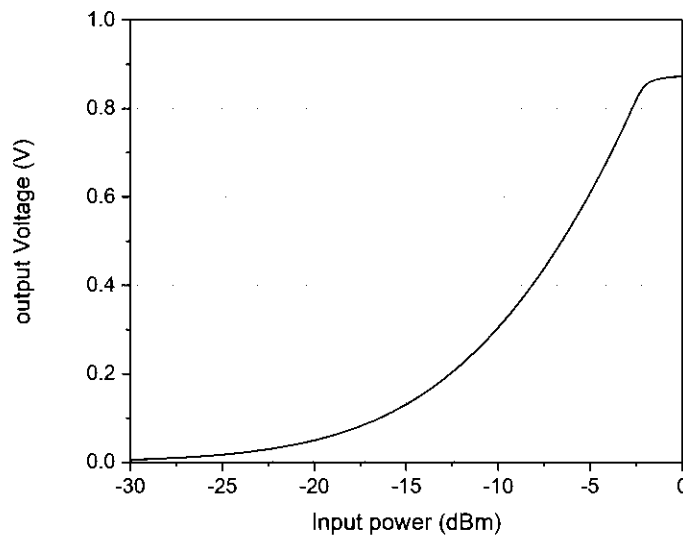


Figure 2. 26: Tension de sortie du redresseur en fonction de la puissance d'entrée.

Il est à noter que les performances de la diode varient suivant la fréquence, la puissance incidente et la charge, qui va influencer sur les performances totales du redresseur. Nous allons analyser les performances de notre redresseur en fonction de ces paramètres, qui représentent une étape très importante pour connaître les limites de fonctionnement du redresseur. La figure 2.27 affiche le coefficient de réflexion en fonction des différents niveaux de la puissance incidente.

On remarque que le redresseur est bien adapté dans la bande de fréquence 5.8 GHz pour la puissance -10 dBm, qui représente la puissance de l'adaptation. Pour les puissances supérieures à -10 dBm, la courbe de coefficient de réflexion décale vers les

hautes fréquences. En fait, pour une puissance de -5 dBm le coefficient de réflexion à la fréquence 5.8 GHz est d'environ -14 dB, jusqu'à atteindre une valeur de -10 dB à la puissance -2 dBm.

Pour les puissances inférieures à -10 dBm, le coefficient de réflexion du redresseur décale vers les basses fréquences. Pour une puissance de -20 dBm le coefficient de réflexion du redresseur est égale -8 dB à la fréquence 5.8 GHz.

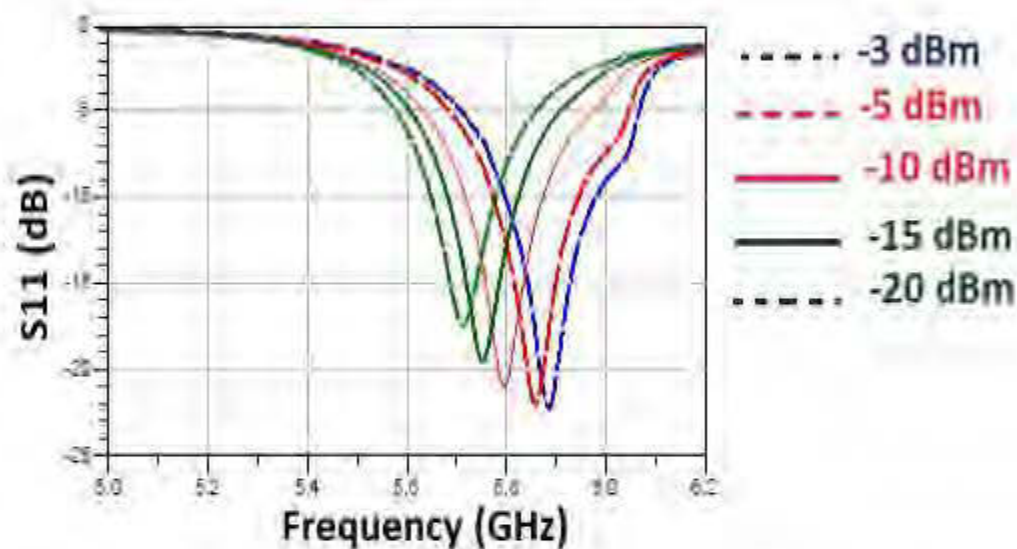


Figure 2. 27: Résultats de Simulation du coefficient de réflexion du redresseur en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la puissance incidente.

La figure 2.28 présente l'efficacité de conversion en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la puissance incidente. Une efficacité de 42 % est obtenue pour une puissance de -3 dBm à la fréquence 5.8 GHz, avec un pic de 46 % à la fréquence 5.89 GHz. La raison pour laquelle ce pic est apparu à la fréquence 5.85 au lieu de 5.8 GHz est due au décalage introduit par l'augmentation de la puissance incidente. De même, l'efficacité diminue en fonction de la puissance. Pour une puissance de -5 dBm, on remarque une efficacité de conversion de 40%, et une efficacité de 32% pour une puissance de -10 dBm à la fréquence 5.8 GHz. Il

est à noter que pour une puissance de -20 dBm, on a eu une très faible efficacité de 10%.

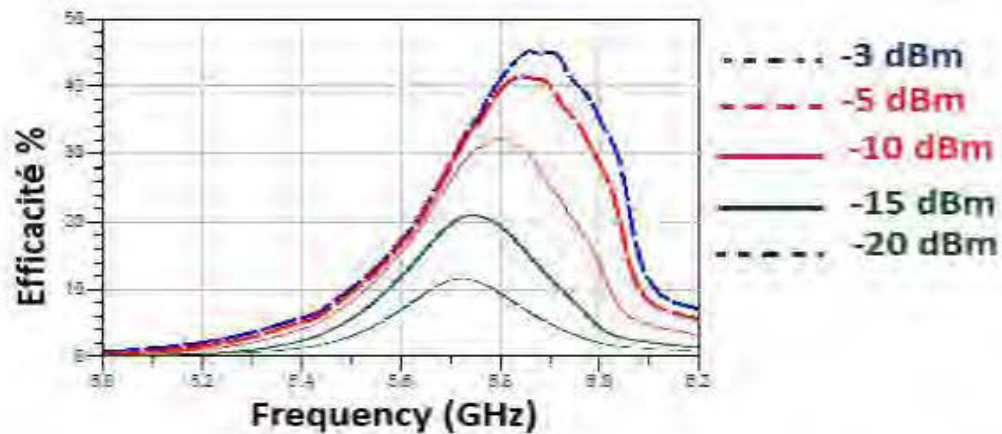


Figure 2. 28: Efficacité de conversion du redresseur en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la puissance incidente.

La puissance d'entrée affecte aussi la tension de sortie. La figure 2.29 montre la tension de sortie du redresseur en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la puissance incidentes.

On remarque pour une puissance de -3 dBm, on a une tension maximale de 0.9V à la fréquence 5.8 GHz. On remarque aussi que la tension de sortie diminue avec la diminution de la puissance d'entrée, à la fréquence 5.8 GHz (la tension de sortie est 0.64 V, 0.3 V et 0.1 V, pour une puissance d'entrée de -5 dBm, -10 dBm, et -15 dBm, respectivement).

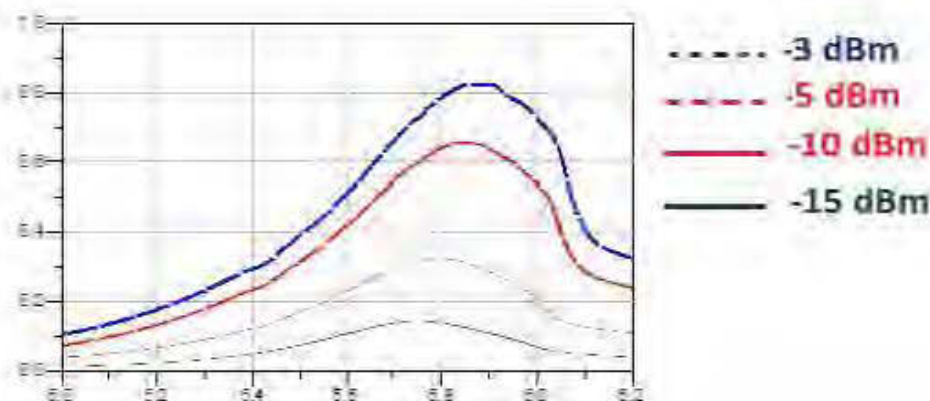


Figure 2. 29: Tension de sortie du redresseur en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la puissance incidente.

Le choix de la résistance de sortie (La charge) est un élément très important aussi pour assurer un bon fonctionnement du redresseur. La figure 2.30 représente l'efficacité de conversion du redresseur en fonction de la charge. On remarque que l'efficacité de conversion diminue avec l'augmentation de la charge. Pour tous les niveaux de puissance, on peut atteindre une efficacité maximale pour une charge de valeur 1.5 KOhm, par exemple pour une puissance de -3 dBm, on peut atteindre une efficacité de 49%, pour une charge de valeur 1.5 KOhm, et une efficacité de 40% pour une charge de 3 KOhm.

La figure 2.31 représente la tension de sortie en fonction de la charge. On remarque aussi une augmentation de la tension de sortie en fonction de la charge, jusqu'à ce qu'elle atteigne une tension maximale pour une charge de 12 KOhm. Pour une puissance de -3 dBm, on a une tension de sortie de 0.8 V pour une charge de 3 KOhm et une tension de sortie de 0.95 V pour une charge de 12 KOhm. À la puissance de l'adaptation (-10 dBm), on constate qu'une tension de 0.3 V est obtenue pour une charge de 3 KOhm et une tension maximale de 0.42 V pour une

valeur de la charge de 12 KOhm. Pour toutes les courbes, la tension maximale est obtenue pour une valeur de la charge de 12 KOhm.

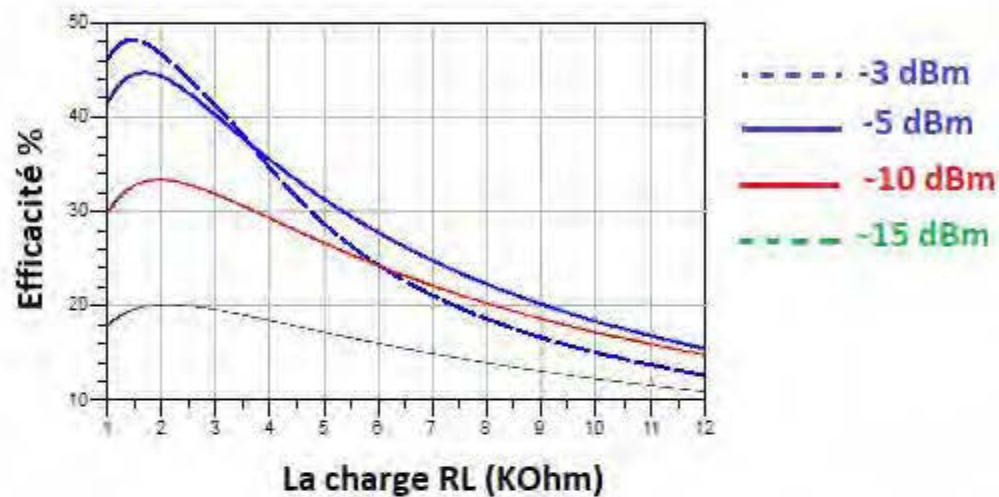


Figure 2.30: Efficacité de conversion en fonction de la charge.

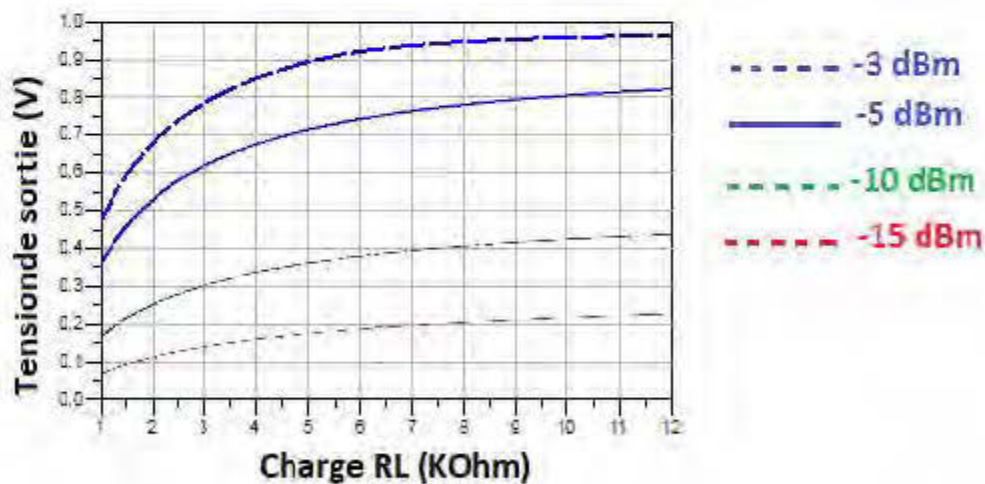


Figure 2.31: Tension de sortie en fonction de la charge.

Le choix de bonnes valeurs de la charge est primordial, car si on choisit une grande valeur, on obtient une grande tension de sortie et une faible efficacité, cependant, pour une valeur de charge faible, on obtient une bonne efficacité de conversion mais une faible tension de sortie. Donc il faut faire un compromis entre efficacité et la valeur de la tension de sortie. Dans ce cas, la valeur choisie est de 3 KOhm, représentant ainsi un bon compromis entre l'efficacité de conversion et la tension de sortie.

2.4 Conception et réalisation d'un réseau Rectenna hexagonale :

2.4.10 Etat de l'art :

Dans cette section, nous présentons les travaux les plus récents, effectués sur les réseaux d'antennes utilisées dans la récupération d'énergie :

Les réseaux d'antennes en tant qu'antennes de réception sont devenus l'une des options importantes dans la conception du Rectenna [21]. Un réseau d'antennes peut atteindre une distribution de courant spécifique en ajustant correctement les éléments d'antenne et les mécanismes d'alimentation. Une étape importante dans la conception des réseaux d'antennes est la détermination de la distribution d'excitation pour le réseau d'alimentation.

La théorie de l'optimisation du gain est rapportée pour la première fois par Cheng en 1965 [21]. Harrington a rapporté une théorie d'optimisation du gain pour un réseau arbitraire d'antenne dans la même année. Dans [21], une méthode d'optimisation de l'efficacité a été proposée pour concevoir un réseau d'antennes pour la récupération d'énergie. La procédure d'optimisation génère des distributions de phase et d'amplitudes des ondes incidentes sur chaque élément d'antenne, sur la base duquel le réseau d'alimentation peut être facilement réalisé. Un réseau d'antennes micro-rubans linéairement polarisés et à gain élevé pour la récupération d'énergie a été utilisée (Figure 2.32). La théorie d'optimisation de l'efficacité de transmission sans fil a été utilisée pour concevoir le réseau d'alimentation du réseau

d'antennes pour atteindre l'efficacité de transmission de puissance maximale avec une configuration d'antenne donnée.

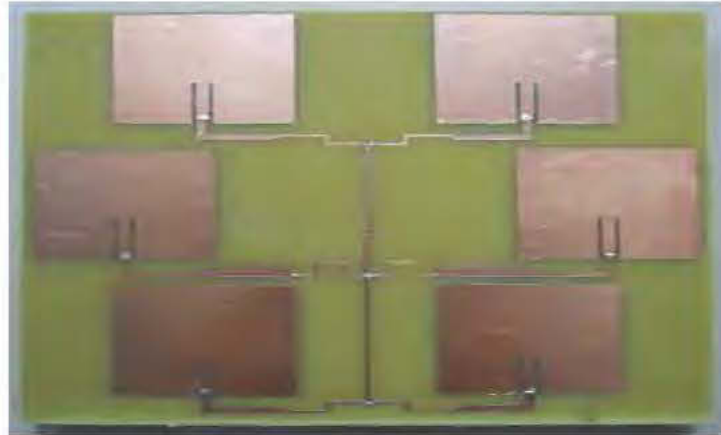


Figure 2. 32 : Le réseaux d'antennes optimisé [21].

Ce réseau fonctionne dans la bande de fréquence 915 MHz comme montré dans la figure 2.33.

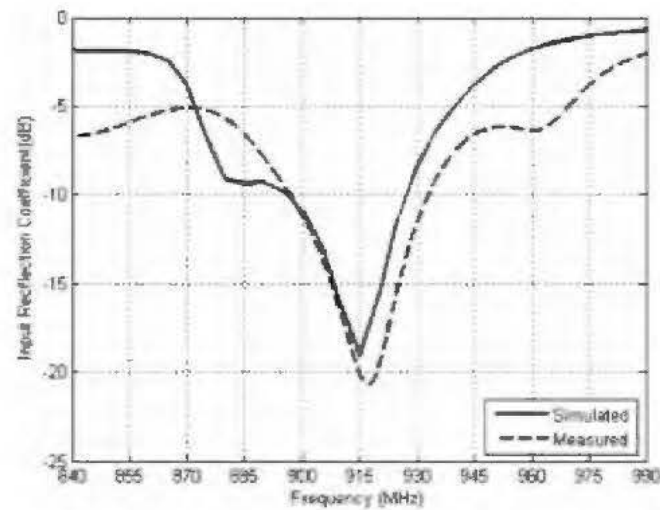


Figure 2. 33 : Coefficient de réflexion du réseau d'antenne [21].

Ce réseau a été conçu pour avoir un gain élevé pour les applications de la récupération d'énergie. Le gain réalisé du réseau d'antenne est de 10,30 dBi à la même fréquence.

Le réseau d'antenne a été aussi utilisé pour les métamatériaux. Le métamatériau désigne un matériau composite artificiel qui présente des propriétés électromagnétiques qu'on ne retrouve pas dans un matériau naturel. Le métamatériau a été parmi les sujets les plus intéressants dans la récupération d'énergie dans ces dernières années. Le métamatériau le plus utilisé dans la récupération d'énergie est le FSS (Frequency Selective Surface) [26]. Il s'agit en général des structures périodiques qui se comportent comme un matériau homogène qui n'existe pas à l'état naturel [14]. Il y'a plusieurs façons pour l'utilisation du FSS dans la récupération d'énergie. Dans ce travail, le centre de la structure FSS agit comme une antenne patch alimentée par une sonde, une couche supplémentaire a été ajoutée à l'arrière de la structure FSS pour remplacer le plan de masse de l'antenne (Figure 2.34).

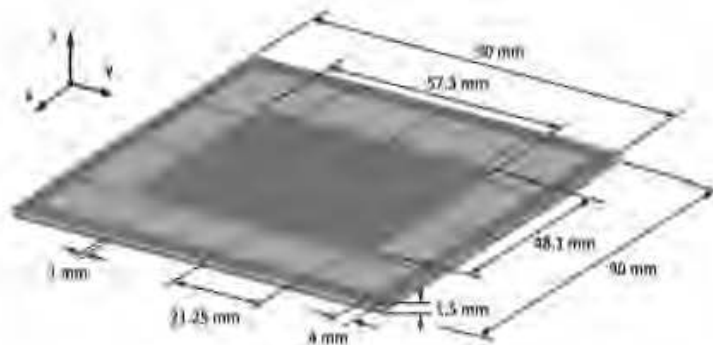


Figure 2. 34 : La conception de FSS [26].

La solution hybride proposée produit une réponse dans la bande de fréquences GSM 900 MHz, avec un rejet de bande à 2,4 GHz. D'autre part, elle agit comme un système de collecte d'énergie à travers l'élément d'antenne à la bande ISM de 2,4 GHz, par exemple pour recyclage de l'énergie Wi-Fi ambiante (Figure 2.35).

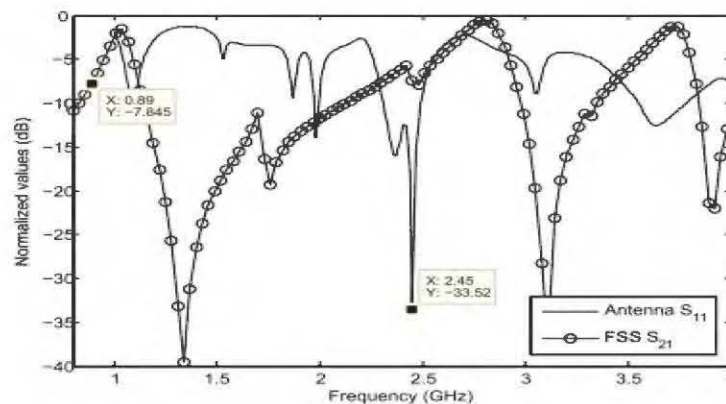


Figure 2. 35 : Bande de travail de FSS [26].

Par suite, un ensemble de 12 cellules unitaires (Figure 2.36) a été mis en œuvre pour alimenter une LED de 56 mW à partir d'un niveau de puissance incidente de -10 dBm, résultant en une puissance moyenne de 300 μ W et une cellule RF-DC d'efficacité de conversion de 50% [26].

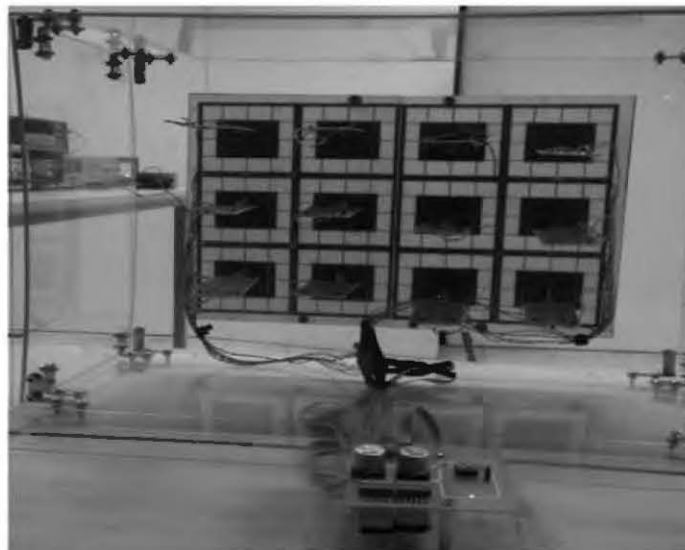


Figure 2. 36: Réseau de FSS [26].

2.4.11 Conception d'un réseau Rectenna hexagonale.

Le réseau d'antenne hexagonale proposé est illustré dans la figure 2.37. Ce réseau est composé de 6 éléments (l'élément de la figure 2.15), ou chaque antenne

reçoit dans une direction orthogonale de l'autre, pour couvrir les 360 degrés. À cause de l'effet du couplage entre les éléments de ce réseau, une optimisation a été effectuée pour le minimiser, avec comme seule modification est que la longueur du patch a été réduite de 1.45 mm.

Le coefficient de réflexion de ce réseau est montré dans la figure 2.38. On remarque que ce réseau fonctionne dans la fréquence 5.8 GHz, avec une bande passante de 1 GHz.

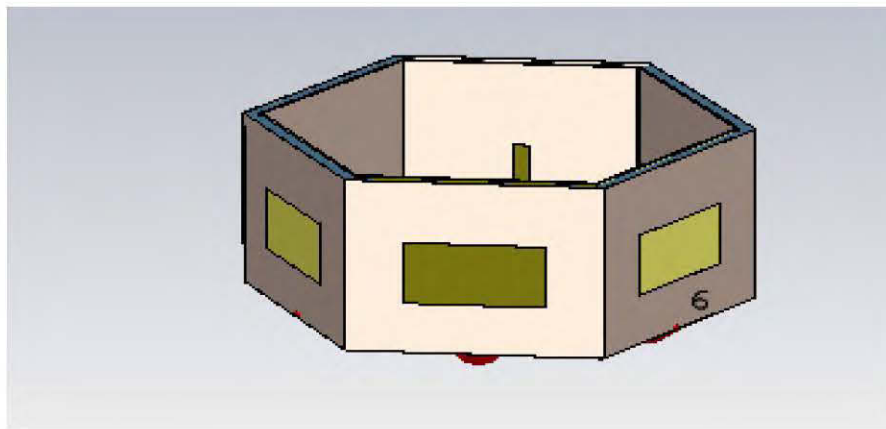


Figure 2. 37 : réseau d'antenne hexagonale.

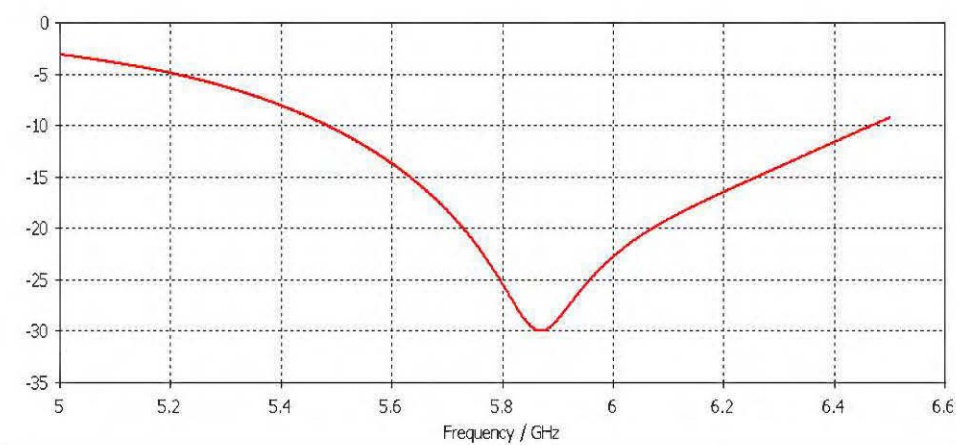


Figure 2. 38 : Coefficient de réflexion du réseau d'antenne Hexagonal.

La figure 2.39 montre le couplage de l'antenne 1 avec les autres antennes. On remarque un très faible couplage entre les éléments de réseau, ou tous les coefficients de couplage sont moins de -32 dB, ce qui montre bien le bon fonctionnement de l'antenne.

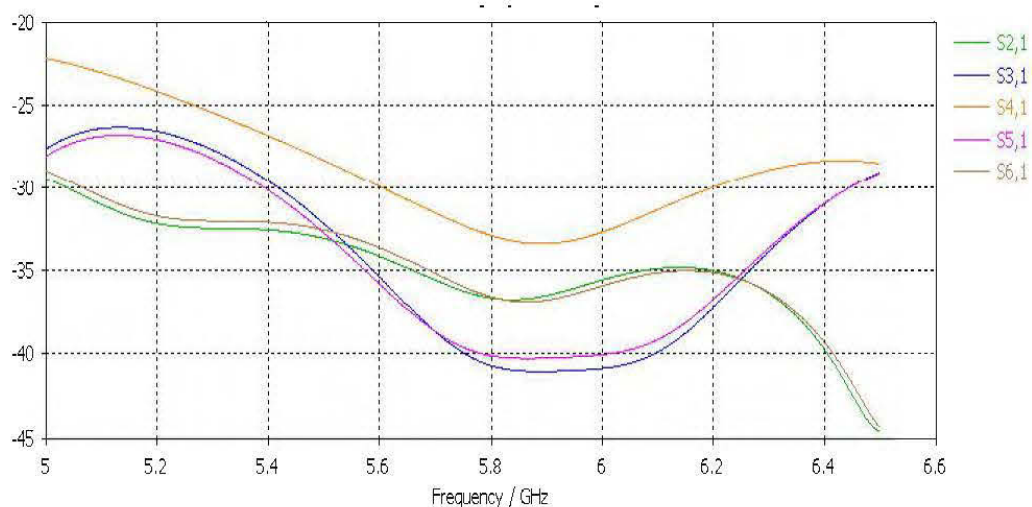


Figure 2. 39: Couplage entre les éléments de réseau.

Le diagramme de rayonnement dans le plan E du réseau en fonction de l'angle est illustré dans la figure 2.40. Cette figure montre l'avantage de l'utilisation d'un réseau d'antenne hexagonal par rapport aux réseaux conventionnels. Il est à noter que ce réseau nous a permis de couvrir 360 degrés avec un gain élevé dans toutes les directions.

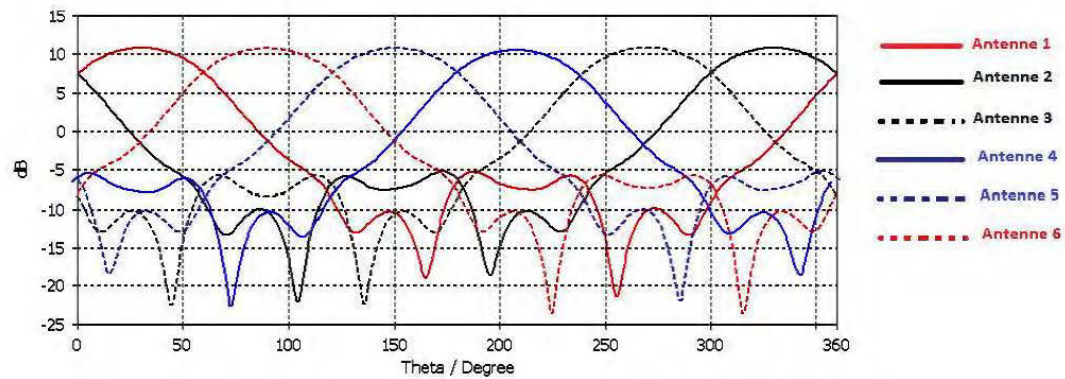


Figure 2. 40 : Diagramme de rayonnement du réseau hexagonal en fonction de l'angle.

Pour augmenter davantage le gain de ce réseau, on va ajouter une structure FSS a chaque élément comme montré dans la figure 2. 41.

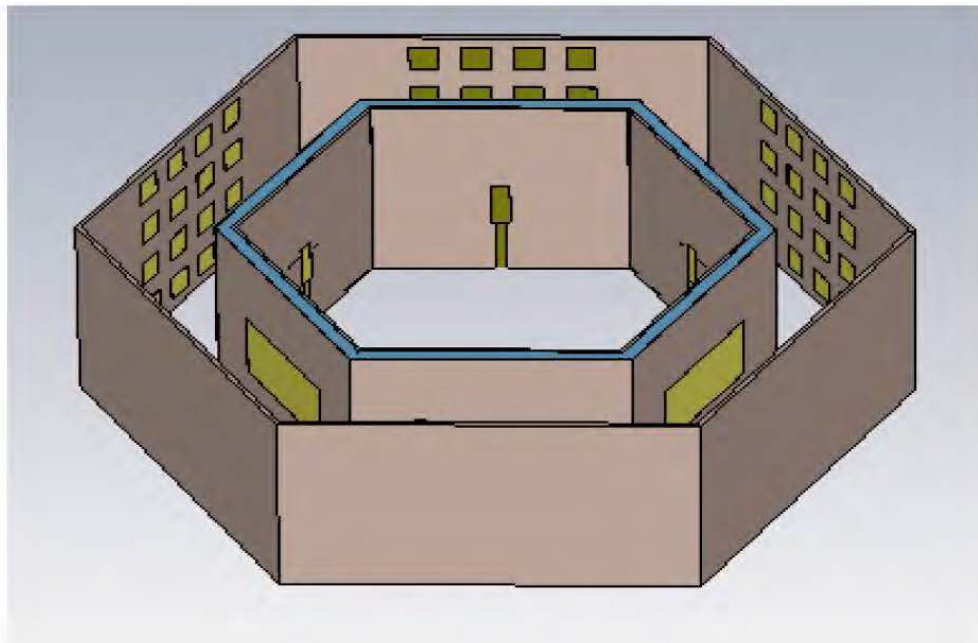


Figure 2.41 : Réseau hexagonale avec la structure FSS.

Les cellules FSS utilisées sont des cellules carrées comme montré la figure 2.42. Ces cellules ont été optimisées pour avoir le maximum de gain possible.

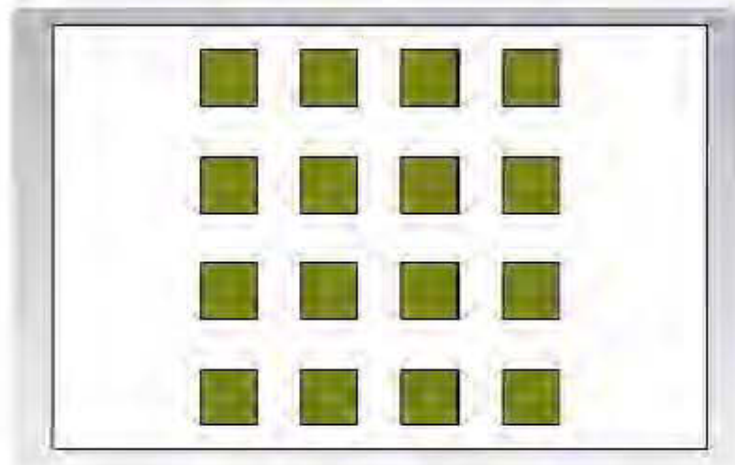


Figure 2. 41: Cellules FSS.

Le coefficient de réflexion du réseau hexagonal est montré dans la figure 2.43. On remarque que le réseau fonctionne dans la fréquence 5.8 GHz, avec une bande passante de 300 MHz.

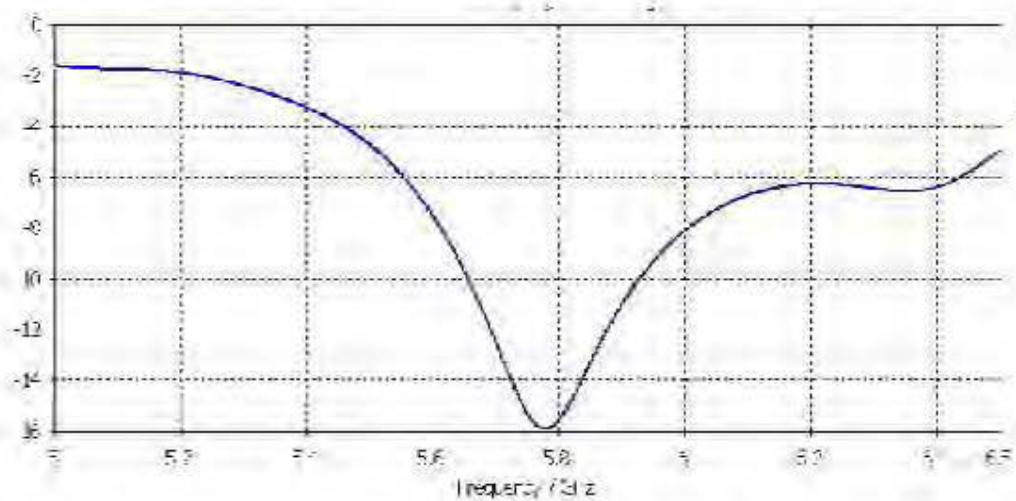


Figure 2. 42: Coefficient de réflexion du réseau avec FSS.

Le diagramme de rayonnement du réseau dans le plan E est montré dans la figure 2.44. On remarque que l'antenne couvre les 360 degrés, ce qui va permettre d'absorber

l'énergie dans toutes les directions avec un gain très élevé de 12.9 dBi de chaque élément.

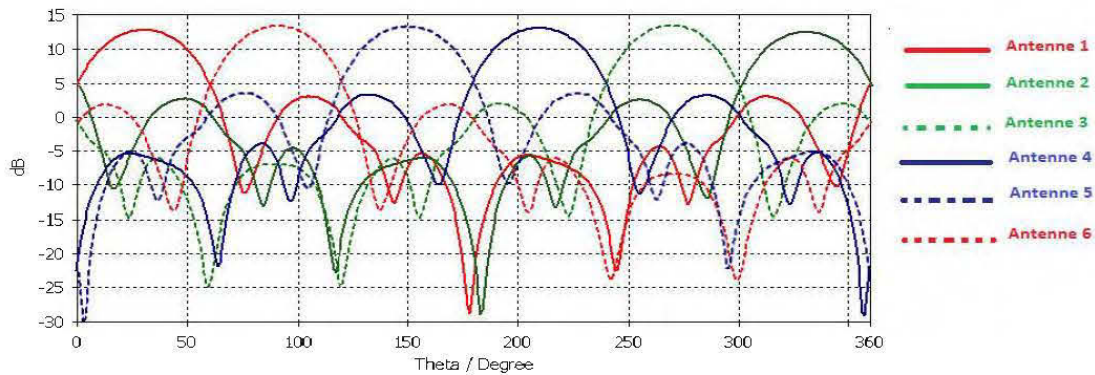


Figure 2. 43: Diagramme de rayonnement de l'antenne en fonction de l'angle θ .

L'avantage principale de ce réseau hexagonal par rapport aux réseaux conventionnels dans la récupération d'énergie est que pour chaque port on a un redresseur pour convertir l'énergie radiofréquence absorbée en énergie continue. Chaque redresseur offre une tension de sortie de 0.9 V à -3 dBm. Donc, si on fait la somme des tensions de chaque redresseur pour augmenter la tension de sortie totale qui va être la tension de sortie de chaque redresseur multiplié par le nombre total de redresseurs :

$$V_{out} (totale) = V_{out} * 6 = 0.9 * 6 = 5.4 \text{ V} \quad \text{à } -3\text{dBm}$$

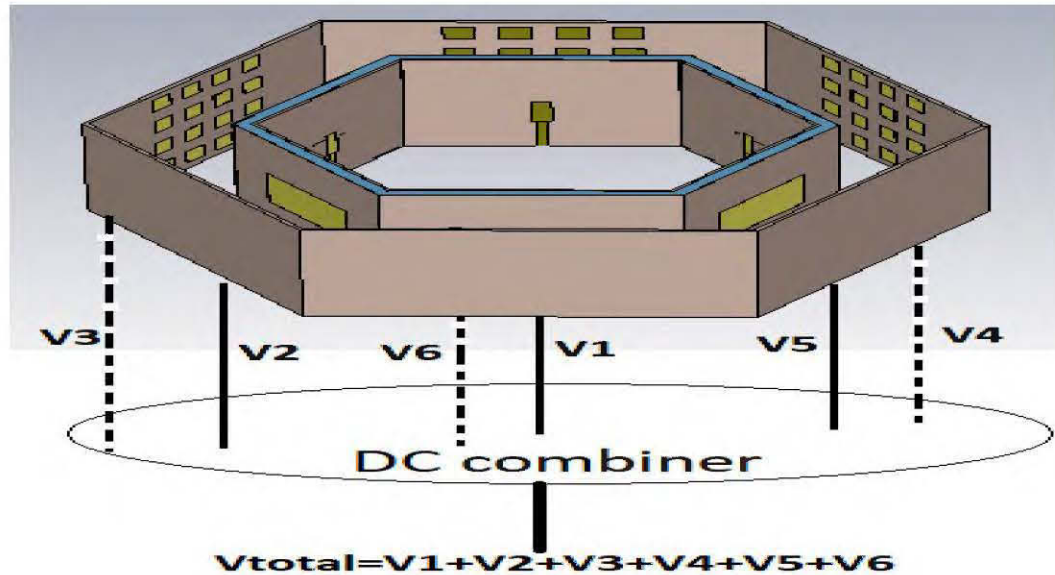


Figure 2. 44: Tension totale du réseau hexagonale.

2.5 Conclusion :

On a présenté dans ce chapitre, une antenne patch avec un gain élevé fonctionnant dans la bande Wifi 5.8 GHz. La conception de cette antenne est basée sur la technologie d'alimentation par couplage. Une structure FSS a été placée au-dessus de l'antenne pour augmenter son gain. Les cellules ont été optimisées pour que l'ensemble de la structure FSS + l'antenne fonctionne dans la fréquence 5.8 GHz, avec un gain très élevé de 13.1 dBi. Cette antenne a été simulée et fabriquée et les résultats montrent une bonne concordance dans la bande de fréquence 5.8 GHz. Un redresseur a été conçu et étudié pour convertir l'énergie radiofréquence absorbée par l'antenne à la fréquence 5.8 GHz en énergie continue. Ce redresseur utilise une seule diode pour la conversion de l'énergie continue, avec une bonne performance, avec une efficacité de conversion de 42 % et une tension de sortie de 0.9 V pour une puissance d'entrée de -3 dBm.

Ensuite, on a conçu un réseau d'antenne hexagonal (6 éléments), en utilisant la même antenne précédemment conçue. L'avantage de ce réseau par rapport à un réseau conventionnel dans les applications de la récupération d'énergie a été aussi démontré. Il a été constaté que ce réseau a permis d'absorber l'énergie avec un grand gain dans

toute les directions (360 degrés angle de couverture). Donc, chaque élément a son propre redresseur, qui donne une tension de sortie de 0.9 V pour une puissance d'entrée de -3 dBm. Comme on a 6 éléments dans ce réseau, la somme des tensions nous a donné une tension de sortie totale de 5.4 V.

CHAPITRE 3

RECTENNA A DOUBLE BANDES POUR LA RECUPERATION D'ENERGIE.

3.1 Introduction :

Nombreux de systèmes sans fils ont été développés et installés dans nos villes. Pour cela, la puissance radiofréquences (RF) dans l'environnement ambiant a considérablement augmenté. Par exemple, nous pouvons facilement recevoir les signaux de télévision, de radio cellulaire et Wi-Fi presque partout, cela nous donne plusieurs sources de densité de puissance RF.

Récemment, la question de comment recycler ou collecter cette énergie RF transmises est devenu un sujet important. Donc il est nécessaire d'utiliser une Rectenna multi bandes pour récupérer la puissance RF.

Dans ce chapitre nous présentons une antenne à double bandes fonctionnant dans les fréquences 3.5 GHz et 5.8 GHz avec un gain élevé dans les deux bandes. En plus, la puissance d'optimisation de l'algorithme génétique pour augmenter davantage le gain de l'antenne sera exploitée. Un redresseur destiné à récupérer l'énergie RF dans les bandes Wi-Fi 5,8 GHz et WIMAX 3.5 GHz est conçu, servant comme un élément de redressement.

3.2 Conception d'une antenne à double bandes.

La figure 3.1 montre la structure de l'antenne référence multicouche avec alimentation par couplage. Cette antenne a été conçue de la même manière que l'antenne présentée précédemment (section 2.3).

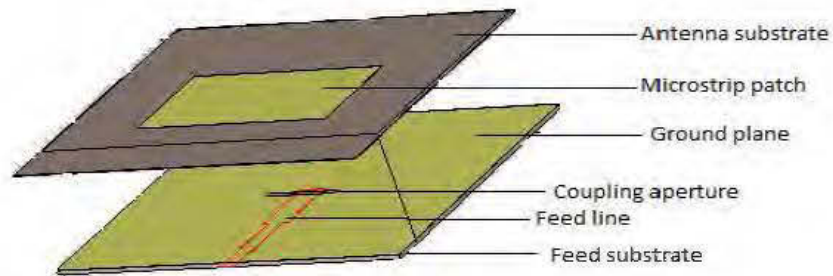


Figure 3. 1: Antenne multicouche de référence.

Les dimensions de l'antenne de référence sont illustrées dans la figure 3.2.

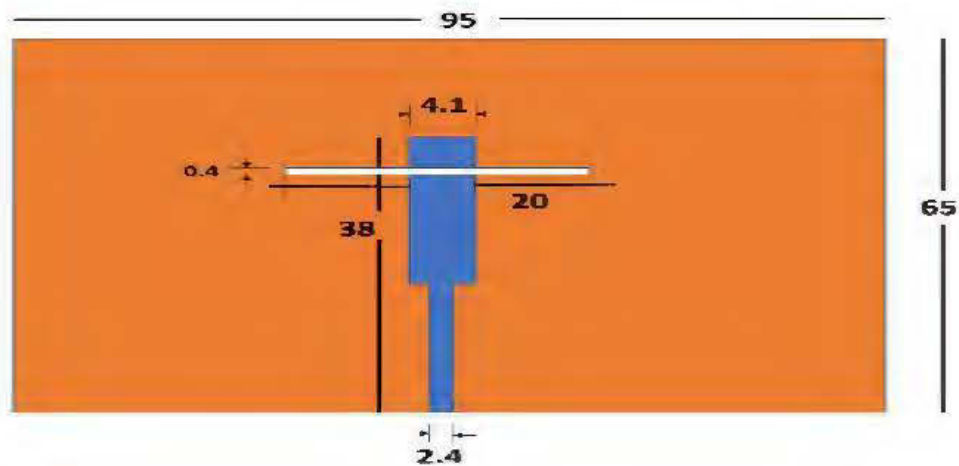


Figure 3. 2 : Dimensions de l'antenne de référence.

La figure 3.3 montre la courbe du coefficient de réflexion de l'antenne de référence. On remarque que cette antenne fonctionne à la fréquence 3.4 GHz.

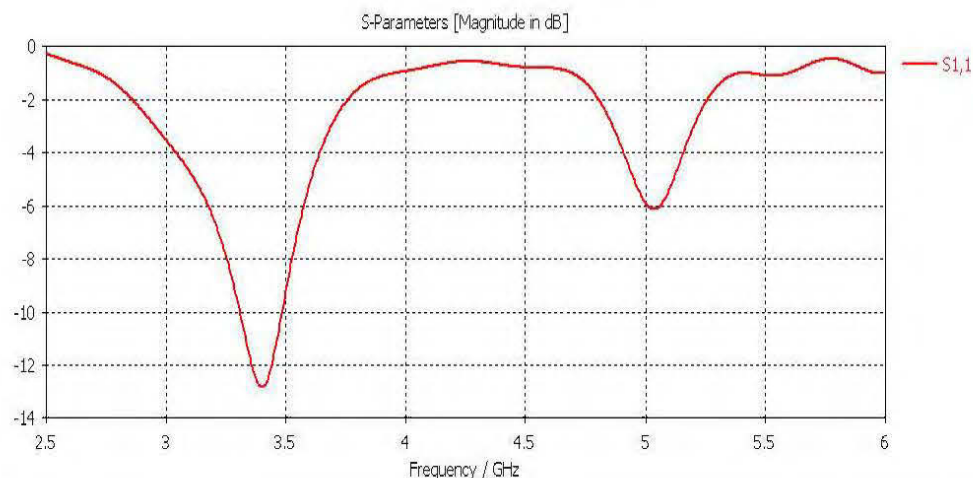


Figure 3. 3: Coefficient de réflexion de l'antenne de référence.

Le but est d'avoir une réponse double bande dans les fréquences 3.5 GHz et 5.8 GHz. Pour ce faire, une fente en forme de la lettre U a été gravée sur le patch comme montre la figure 3.4. La fente a pour rôle de créer une fréquence de résonance à 5.8 GHz. Les dimensions de la fente ont été bien optimisées pour avoir une réponse à double bande de fréquence.

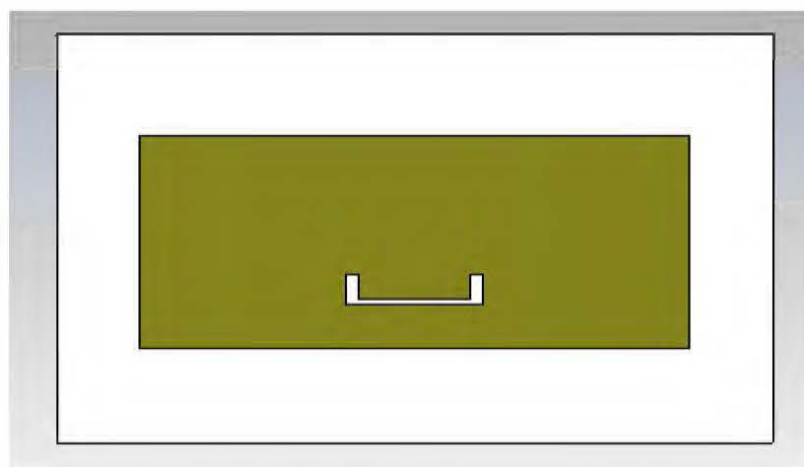


Figure 3. 4: Fente U gravée sur le patch.

Pour bien analyser l'effet de la fente U sur le coefficient de réflexion de l'antenne, on va vérifier la réponse de chaque fente qui forment la lettre U sur l'antenne (figure 1.5).

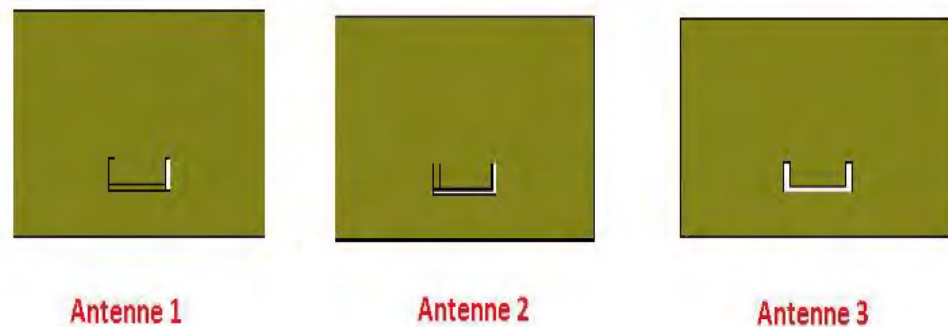


Figure 3. 5: Antenne avec différentes formes de fentes.

La réponse de chaque antenne est illustrée dans la figure 3. 6.

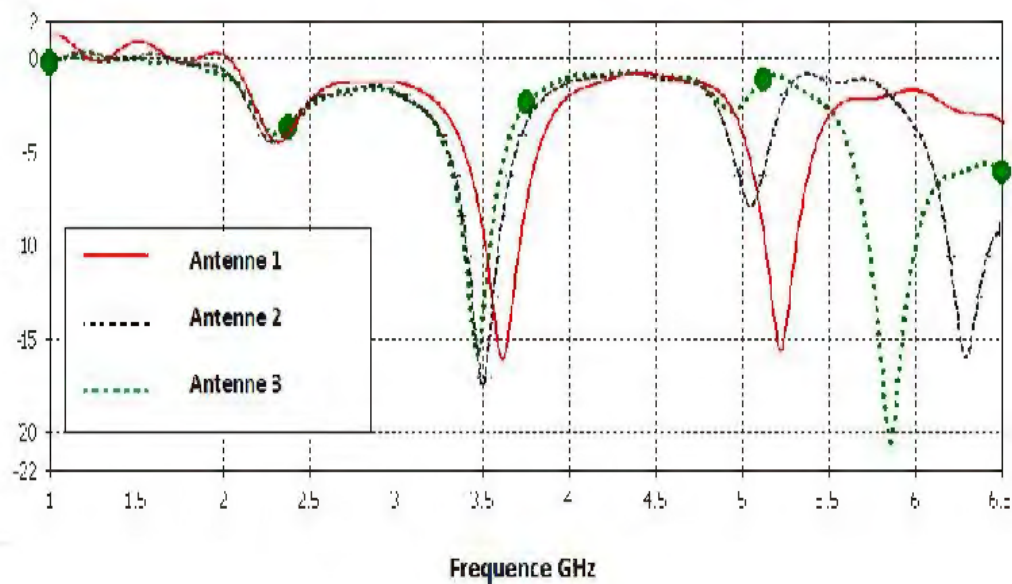


Figure 3. 6: Coefficient de réflexion .

Pour la première antenne, la fente verticale à droite crée une fréquence de résonance dans la fréquence 5.2 GHz, avec une mauvaise adaptation à la fréquence 3.5 GHz (-10 dB).

Une fente horizontale a été ajoutée à l'antenne précédente, pour améliorer sa réponse en fréquence. La figure 3. 5 montre la deuxième antenne avec un autre type de fente. Il est à noter que la deuxième antenne fonctionne dans la fréquence 3.5 GHz avec une bonne adaptation (-17 dB). Cependant, elle fonctionne dans la bande 6.4 comme une deuxième bande de fréquence.

Pour décaler la fréquence 6.4 GHz à la fréquence 5.8 GHz, une fente vertical a été ajoutée à gauche. De ce fait, la troisième antenne fonctionne bien dans la fréquence 5.8 GHz (presque -20 dB), et reste opérationnelle aussi dans la fréquence 3.5 GHz (-17 dB).

Les dimensions de l'antenne double bande sont illustrées dans la figure 3.7.

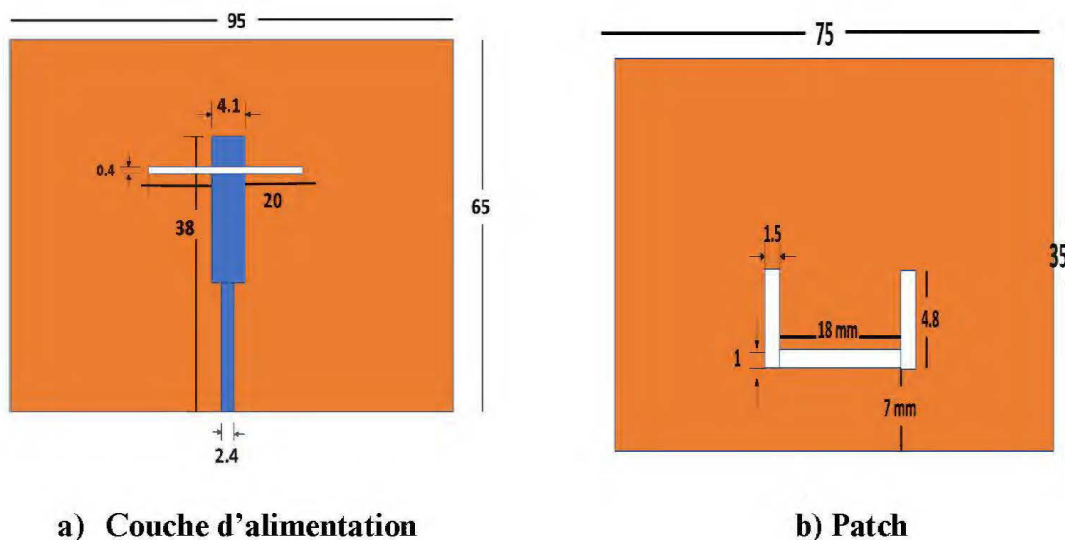


Figure 3. 7: Dimensions de l'antenne à double bande.

3.2.1 Interprétation des résultats :

La figure 3.8 montre les résultats mesurés et simulés du coefficient de réflexion de l'antenne à double bande.

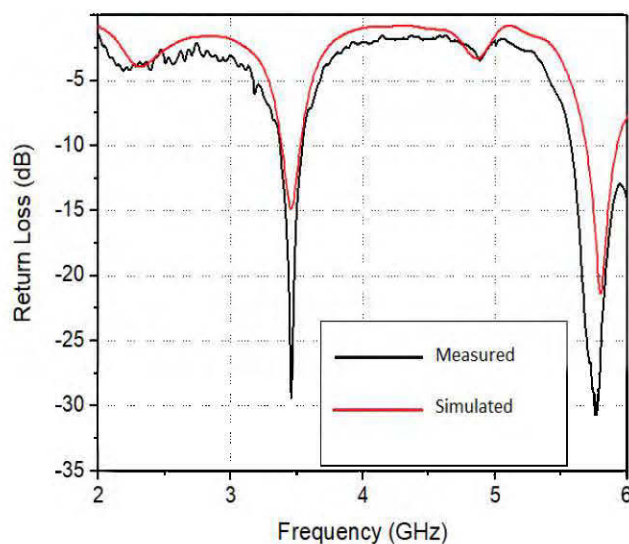


Figure 3. 8: Coefficient de réflexion de l'antenne à double bande.

On remarque une bonne concordance entre les résultats de mesure et de simulation, et l'antenne proposée rayonne dans les deux bandes de fréquences 3.5 GHz et 5.8 GHz.

Le diagramme de rayonnement dans le plan E et H (figure 3.9) à la fréquence 3.5 GHz montre un gain directif de l'antenne patch de 10.1 dBi. Les résultats de mesure du diagramme ont une bonne concordance avec celles de simulations.

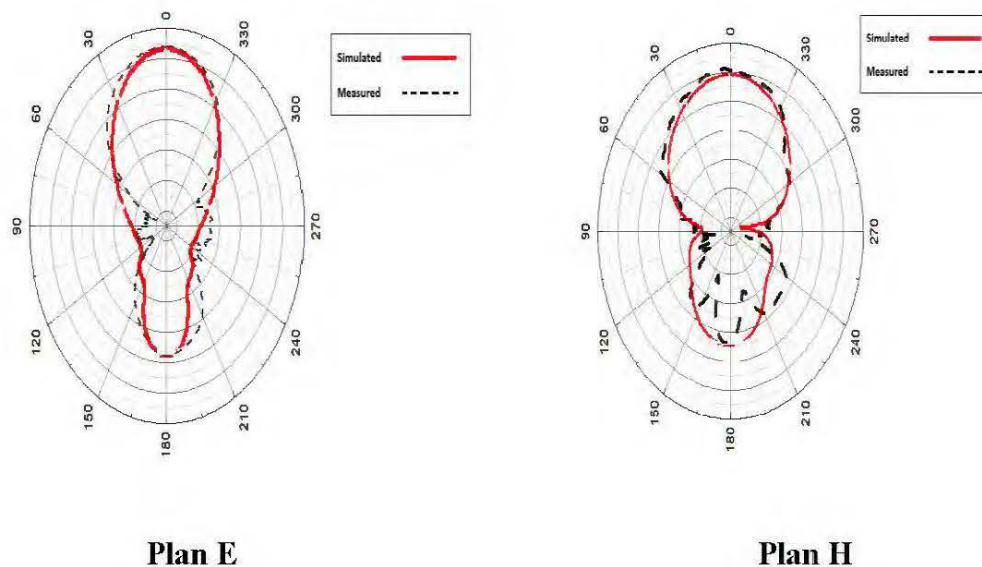


Figure 3. 9: Diagramme de rayonnement à la fréquence 3.5 GHz

Le diagramme de rayonnement dans le plan E et H (figure 3.10) à la fréquence 5.8 montre un gain directif de l'antenne patch de 8.04 dBi. De même, les résultats de mesure du diagramme ont une bonne concordance avec celles de simulations.

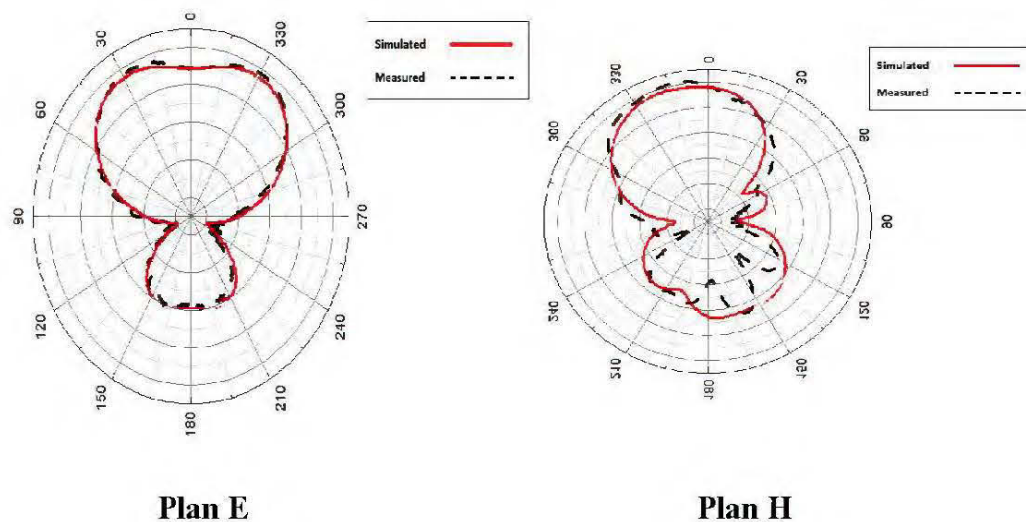


Figure 3. 10 : Diagramme de rayonnement de l'antenne à la fréquence 5.8 GHz.

3.3 Amélioration du gain de l'antenne en utilisant l'algorithme génétique.

Pour améliorer davantage le gain de l'antenne proposée dans les deux bandes, on a utilisé l'outil de l'optimisation de l'algorithme génétique pour trouver le maximum du gain qu'on peut atteindre dans les deux bandes.

L'antenne de référence est la même antenne illustrée dans la figure 3.1. Pour atteindre une réponse à double bandes, une fente rectangulaire a été gravée dans le patch de l'antenne de référence. L'antenne proposée est ensuite optimisée à l'aide de l'algorithmes génétiques (GA). L'AG a été développé pour optimiser la fente rectangulaire pour avoir une résonnance à la fréquence de 5,8 GHz, tout en conservant un gain maximum dans les deux bandes de fréquences de 3,5 GHz et 5,8 GHz, respectivement. La procédure d'optimisation est détaillée dans [27].

L'emplacement et les dimensions de la fente sont illustrés dans la figure 3. 11.

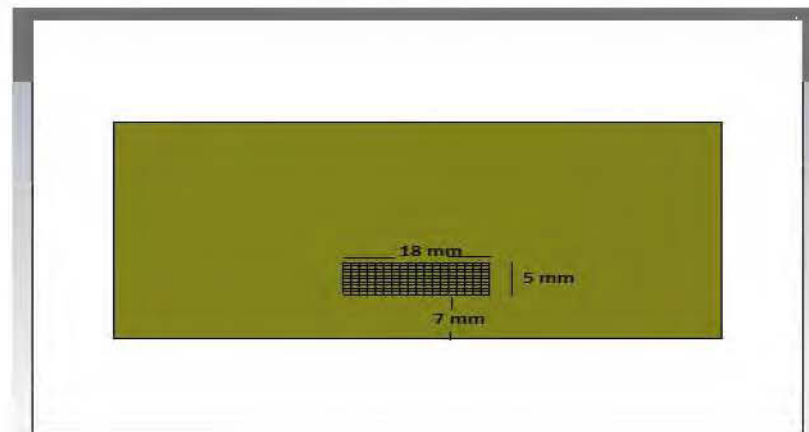


Figure 3. 11: Emplacement et dimensions de la fente.

L'emplacement de la fente est choisi de telle sorte que la même surface qui devrait être occupée par la fente en forme U est couverte.

L'algorithme génétique divise la fente rectangulaire en 18x10 pixels, ce qui nous donne $Q = 180$ (Q est le nombre total de pixels). La présence et l'absence de pixels peuvent être représentées par un nombre binaire $x_q \{0, 1\}$, $q = 1, 2, \dots, Q$, qui sont regroupés dans des vecteurs $x = \{x_1, x_2, \dots, x_Q\}$ pour décrire la configuration des pixels dans la fente rectangulaire.

À partir de 2^Q différentes configurations de x , l'AG déterminera le x correspondant à la meilleure solution du problème suivant :

$$\begin{cases} \min_x S_{11}(x; f_1); S_{11}(x; f_2) \\ \max_x G(x; f_1); G(x; f_2) \end{cases} \quad (3.1)$$

Où $S_{11}(x; f_k)$ est le coefficient de réflexion de l'antenne, $G(x; f_k)$ est le gain réalisé, $f_1 = 3.5$ GHz, $f_2 = 5.8$ GHz.

Afin de résoudre le problème 1, l'algorithme génétique est lancé sous Logiciels CST Microwave Studio.

L'algorithme coupe un nombre aléatoire de pixels de la fente à chaque itération, puis calcule son S_{11} et son gain dans les deux fréquences (3.5 GHz et 5.8 GHz), et les compare aux résultats désirés. Le but de l'algorithme est de trouver la meilleure structure qui nous donne une antenne fonctionnant dans les fréquences 3.5 GHz, et 5.8 GHz avec un gain maximale dans les deux bandes de fréquences. La meilleure structure obtenue est illustrée dans la figure 3. 12.

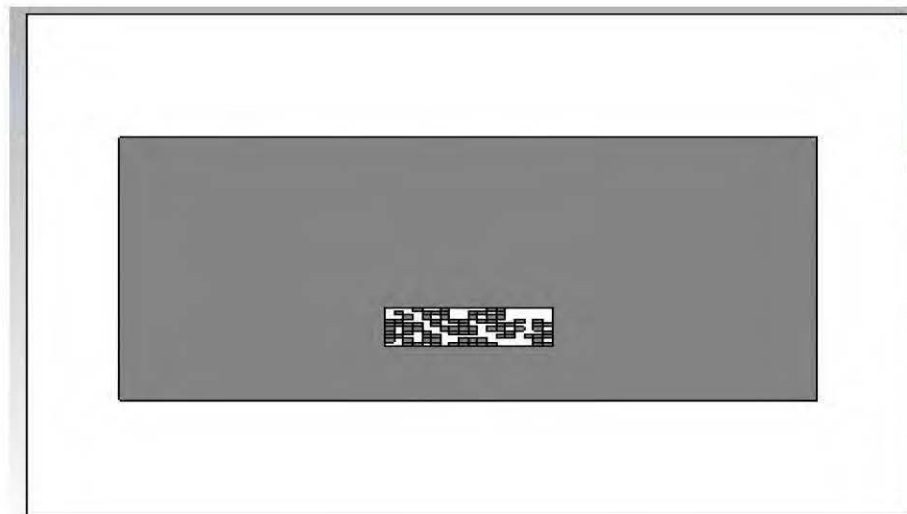


Figure 3. 12: Structure optimisée.

La réalisation de l'antenne optimisée est illustrée dans la figure 3.13.

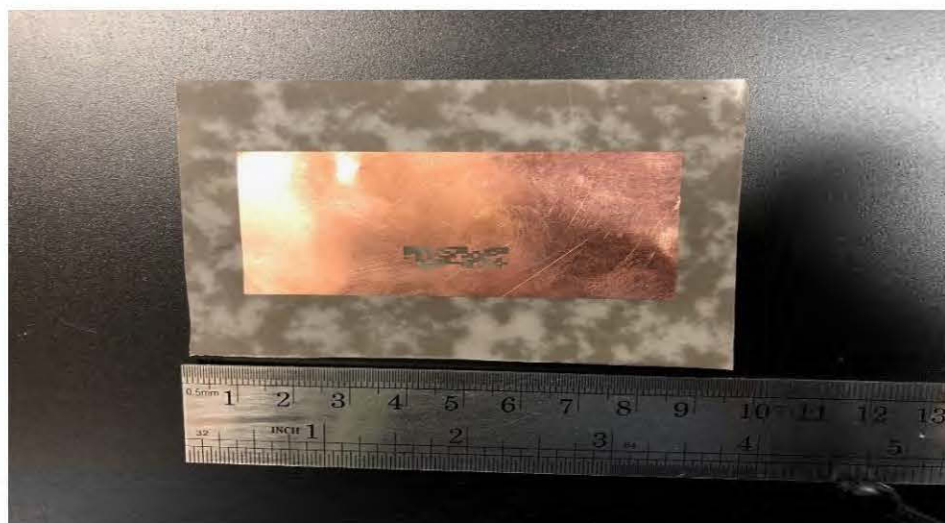


Figure 3. 13: Réalisation de l'antenne optimisée.

3.3.2 Interprétation des résultats :

La figure 3.14 montre les résultats mesurés et simulés du coefficient de réflexion de l'antenne à double bande de fréquence.

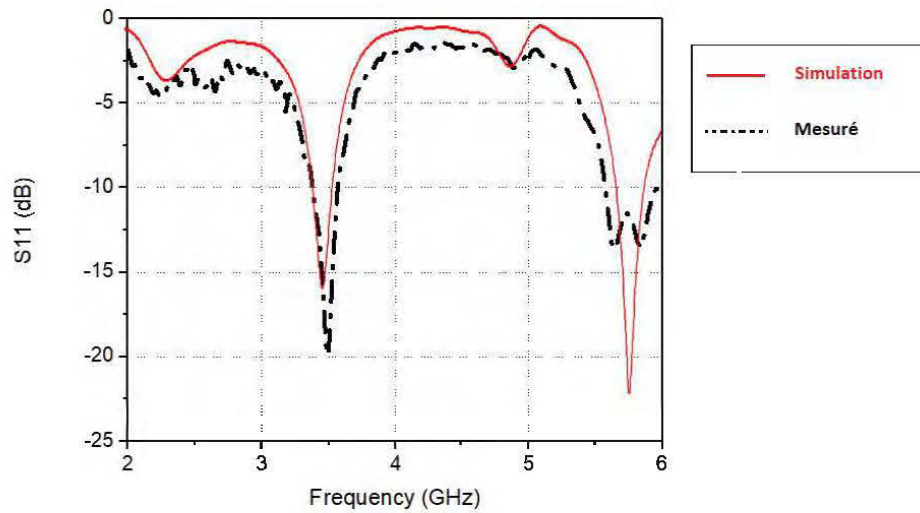
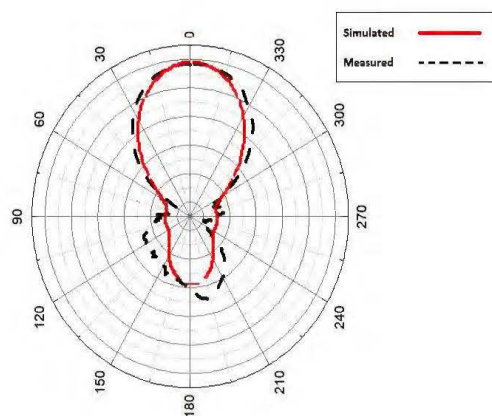


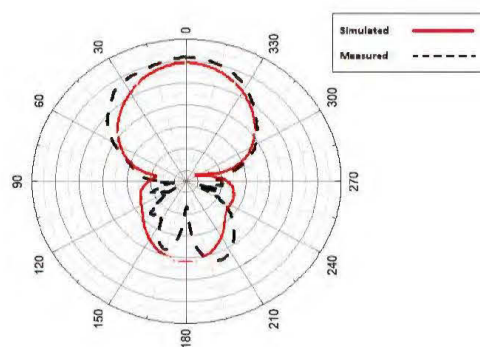
Figure 3. 14: Coefficient de réflexion de l'antenne à double bande.

On remarque une bonne concordance entre les résultats de mesure et de simulation. De ce fait, on peut conclure que l'antenne proposée rayonne dans les deux bandes de fréquences 3.5 GHz et 5.8 GHz.

Le diagramme de rayonnement dans le plan E et H (figure 3.15) à la fréquence 3.5 montre un gain maximal de l'antenne optimisée de 10.2 dBi avec une augmentation de 0.1 dBi par rapport l'antenne avec fente U. Les résultats de mesure du diagramme ont une bonne concordance avec celles de simulation.



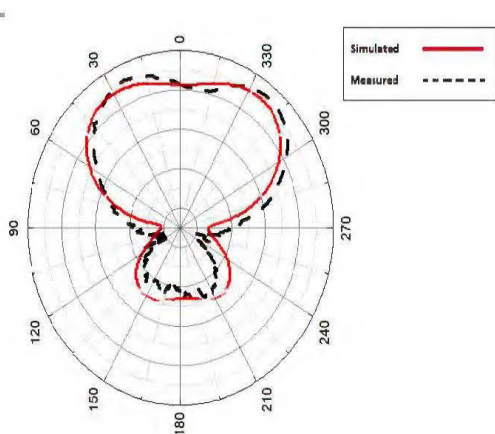
Plan E



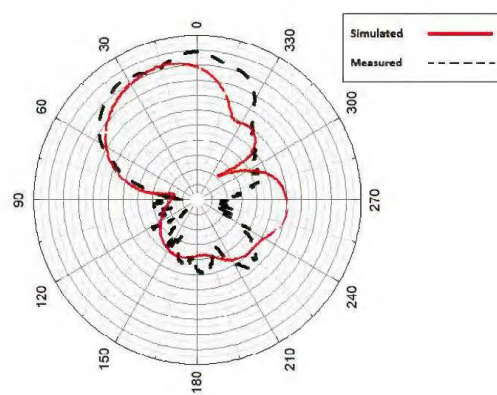
Plan H

Figure 3. 15: Diagramme de rayonnement à la fréquence 3.5 GHz

Le diagramme de rayonnement dans le plan E et H (figure 3.16) à la fréquence 5.8 montre un gain maximal de l'antenne de 8.92 dBi avec une augmentation de 0.88 dBi par rapport l'antenne précédente. Les résultats de mesure du diagramme ont une bonne concordance avec celles de simulation.



Plan E



Plan H

Figure 3. 16: Diagramme de rayonnement à la fréquence 5.8 GHz.

Le tableau 3.1 montre une comparaison de l'antenne proposée avec d'autres antennes à double bandes rapportées dans la littérature :

Tableau 3. 1: Comparaison.

Référence	Fréquence (GHz)	Type d'antenne	Gain (dBi)
[28]	2.5 ,5.8	Quasi-Pifa	6.62, 6.25
[29]	2.45, 5.3	Quasi- Yagi	5.7, 5.9
[30]	2.45, 5.2	Rectangular patch	6.2, 10.4
[31]	1.95, 2.45	Stacked Disk	8.3, 7.8
Ce travail	3.5, 5.8	Coupled Antenna	8.92,10.2

3.4 Redresseur à double bandes.

3.4.3 Architecture globale d'un redresseur à double bandes :

Afin de récupérer l'énergie de plusieurs bandes RF, plusieurs topologies de redresseur RF sont proposées dans la littérature. La principale différence réside dans la conception du filtre passe-bande RF. La fonctionnalité du filtre doit correspondre à l'impédance de l'antenne et à l'impédance conjuguée de l'entrée du redresseur. De plus, l'impédance d'entrée du redresseur varie en fonction de la fréquence et de la puissance incidente. L'impédance de l'antenne peut également varier en fonction de la fréquence. Il est donc plus facile d'adapter les impédances à une seule fréquence que sur une bande RF. Sur cette base, l'adaptation sur plusieurs bandes RF induit deux types de pertes : celles dues à la désadaptation d'impédance et celles dues à la complexité du filtre.

Les pertes dues aux difficultés d'adaptation de l'impédance sur une large bande passante ont été étudiées dans [32] et [33] (Figure 3. 17 (a)). En raison de la variation des impédances, une bande RF de quelques centaines de MHz induit une désadaptation d'impédance, et donc une diminution de l'efficacité de la conversion RF-DC. L'efficacité de la conversion RF-DC n'est que de 8% sur une bande RF de 1550 MHz

pour une puissance incidente de 20 dBm en [32]. Cependant, cette efficacité a été presque doublée à 15% dans [33] pour la même puissance incidente et la même topologie, mais sur une bande RF de 300 MHz. Afin d'améliorer l'efficacité de la conversion RF-DC, il est préférable de récolter l'énergie de plusieurs petites bandes RF plutôt que d'une seule.

De même, les pertes dues à la complexité du filtre ont été rapportées dans [32] et [34-37] (figure 17 (b)). Une bonne adaptation sur plusieurs bandes de fréquences nécessite des filtres passe-bande RF d'ordre élevé présentant des inconvénients en termes de complexité. L'efficacité de la conversion RF-DC reste inférieure à 30%, sauf pour [32], qui atteint 40% à 1,8 et 2,1 GHz.

La Figure 17 (c) illustre l'architecture utilisée dans ce mémoire. L'association du filtre passe-bande RF, du redresseur et du filtre passe-bas est appelée une branche RF. Le nombre de branches RF n'est pas limité. Une antenne multi bandes avec un seul port est connectée à l'entrée du circuit pour avoir une structure plus compacte. Afin d'améliorer l'efficacité de la conversion RF-DC, le circuit doit prendre en compte les contraintes d'adaptation d'impédance des différents composants impliqués, à savoir les redresseurs en parallèle et l'antenne. Afin de faire correspondre chaque redresseur parallèle aux fréquences dédiées, des filtres passe-bande RF sont utilisés. Exemple, pour une antenne double bande fonctionnant dans les fréquences 3.5 GHz et 5.8 GHz, on utilise deux filtres passe bandes, un pour passer la bande de 3.5 GHz et l'autre pour la bande 5.8 GHz. Pour chaque branche RF, la largeur de bande est choisie pour couvrir toute la densité de puissance RF dans une bande RF standard, telle que le WIMAX ou le WIFI. Enfin, les tensions de sortie de chaque branche RF sont connectées ensemble pour additionner les puissances récoltées. Tous les signaux RF doivent être bloqués par un filtre passe-bas pour transmettre que la composante continue à la charge.

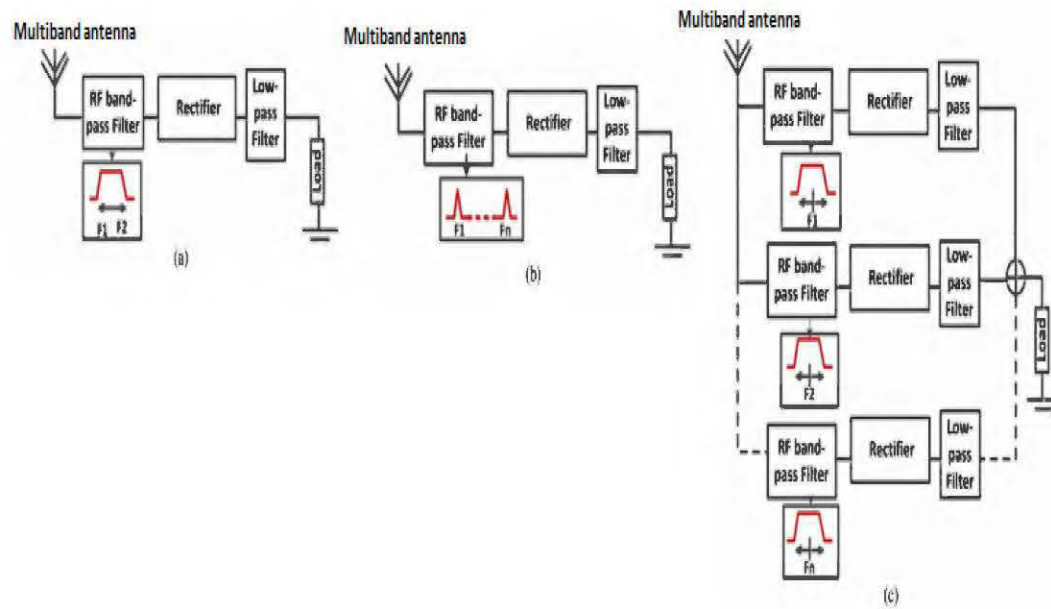


Figure 3. 17: Redresseurs RF multi bandes : (a) avec un seul filtre passe-bande RF conçu pour une large bande RF, (b) pour plusieurs fréquences et (c) architecture utilisée. [1]

3.4.4 Conception d'un redresseur à double bandes :

La conception du redresseur a été effectuée dans le but de parvenir à un bon équilibre entre la complexité du circuit, le nombre de composants utilisés et leur performance à faible puissance.

Le schéma du redresseur conçu est présenté dans la figure 3. 18. Les paramètres du circuit ont été optimisés pour obtenir le rendement maximal de conversion RF-DC pour des niveaux de puissance d'entrée de -10 dBm. La conception a été faite en utilisant logiciel Advanced Design System.

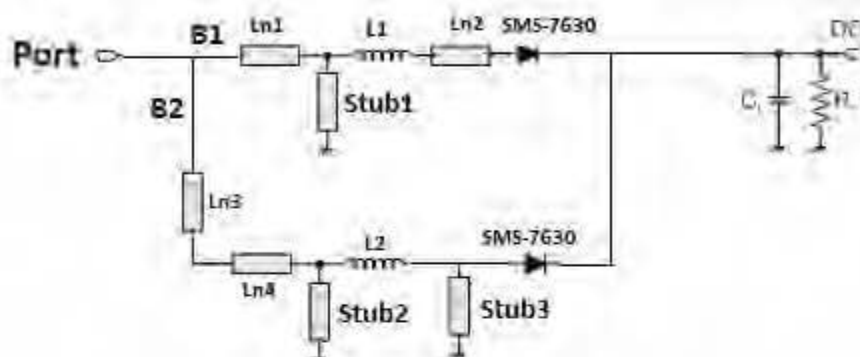


Figure 3. 18: Redresseur à double bande conçu.

Afin d'obtenir une bonne efficacité de conversion RF-DC du redresseur dans toutes les bandes, on a utilisé deux diodes en parallèle de telle manière que chacune des diodes fonctionne dans une bande. Chaque branche, étiquetée « B1 », « B2 » dans la figure 3. 18, a été conçue pour fonctionner autour de 3.5 GHz et 5.8 GHz, respectivement. Pour rendre le processus d'optimisation aussi précis que possible, les fichiers de paramètres S fournis par le fabricant (Coilcraft) pour les inductances localisées ont été pris en considération lors de la conception sous le logiciel. Enfin, toutes les branches étaient connectées à un seul filtre RC.

La diode Schottky Skyworks SMS7630 a été utilisée en raison de sa faible tension de seuil. Le substrat est Rogers RT / Duroid 5880 (dont la constante diélectrique est de 2,2) avec une épaisseur de 0,787 mm. Un condensateur avec une valeur de 100 pF est utilisé comme un filtre passe-bas afin de garantir que seul le courant continu passe à la charge de 3 k. Les stubs (Stub2 et Stub1) et les bobines L1 et L2 sont utilisés pour l'adaptation d'impédance. Les dimensions du redresseur ont été conçues et optimisées pour obtenir une bonne adaptation d'impédance sous la contrainte de la faible puissance d'entrée de -10 dBm ($L_{n1} = 6.2$ mm, $L_{n2} = 2$ mm, $L_{n3} = 3.5$ mm, L_{n4}

= 3.5 mm, Stub1 = 2.9 mm, Stub2 = 8.1 mm, Stub3=6.1, L1 = 5.6, L2=1.6 nH, la largeur des lignes de transmission $W = 2,38$ mm).

3.4.5 Résultats et discussion :

Le coefficient de réflexion simulé S_{11} à -10 dBm de puissance RF d'entrée est illustré dans la figure 3.19. On peut remarquer que le redresseur présente une bonne d'adaptation d'impédance dans les deux bandes de fréquences 3.5 GHz et 5.8 GHz.

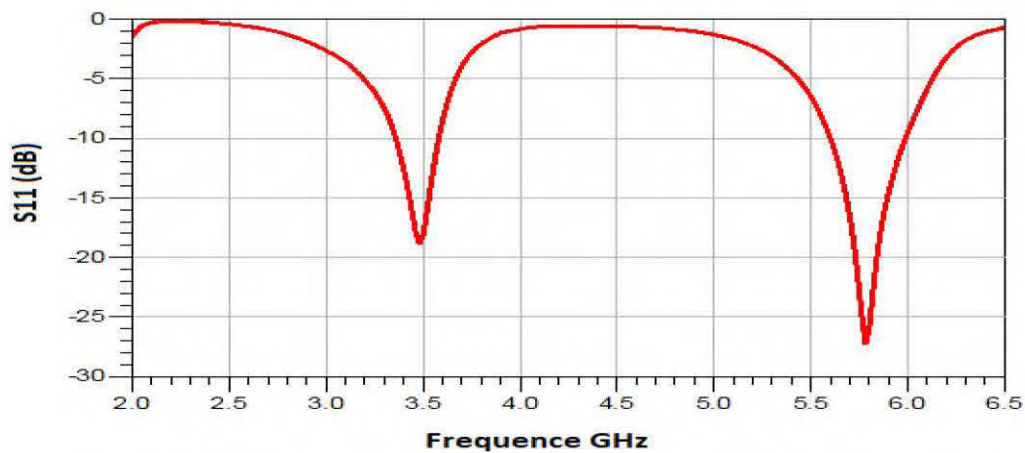


Figure 3. 19: Coefficient de réflexion du redresseur.

L'efficacité de conversion RF-DC simulée du redresseur aux fréquences 3.5 GHz et 5.8 GHz par rapport à une puissance d'entrée de -10 dBm est montrée dans la figure 3. 20. Il est à noter que l'efficacité du redresseur à la fréquence 3.5 GHz est égale à 42% à -10 dBm, avec une efficacité de 30% à la fréquence 5.8 GHz, démontrant une bonne performance de rectification.

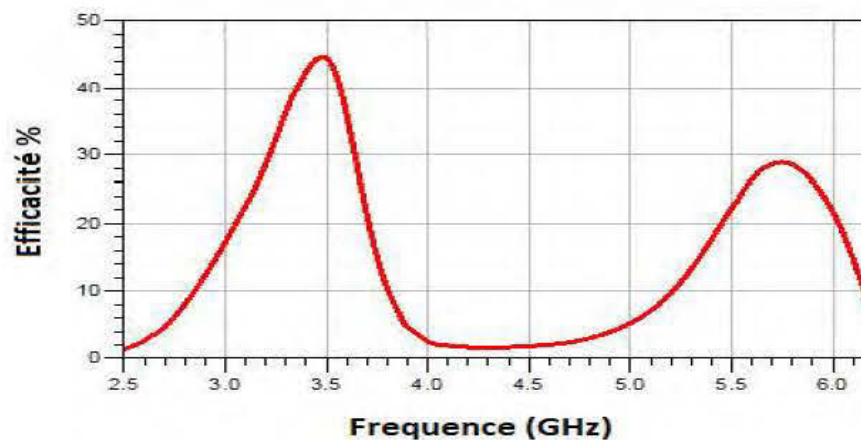


Figure 3. 20: L'efficacité de conversion RF-DC du redresseur à la puissance -10 dBm.

La tension DC de sortie simulée aux différentes fréquences par rapport à la puissance d'entrée est également illustrée à la figure 3.21. Pour une puissance d'entrée de -10 dBm, une tension continue de 0,3 V a été obtenue si le circuit fonctionne seulement dans la fréquence 5.8 GHz, tandis qu'une tension de 0.38 V peut avoir lieu si le circuit fonctionne dans la fréquence 3.5 GHz. Lorsque le redresseur fonctionne dans les deux fréquences 3.5 GHz et 5.8 GHz au même temps, on obtient une tension de sortie de 0.49 V, avec une augmentation de 0.11 V par rapport la tension obtenue à la fréquence 3.5 GHz seule et une augmentation de 0.19 V par rapport à celle obtenue à la fréquence 5.8 GHz seule, qui représente une bonne amélioration pour une faible puissance de -10 dBm. Cela démontre l'utilité de l'utilisation un redresseur multi-bandes par rapport à un redresseur mono-bande

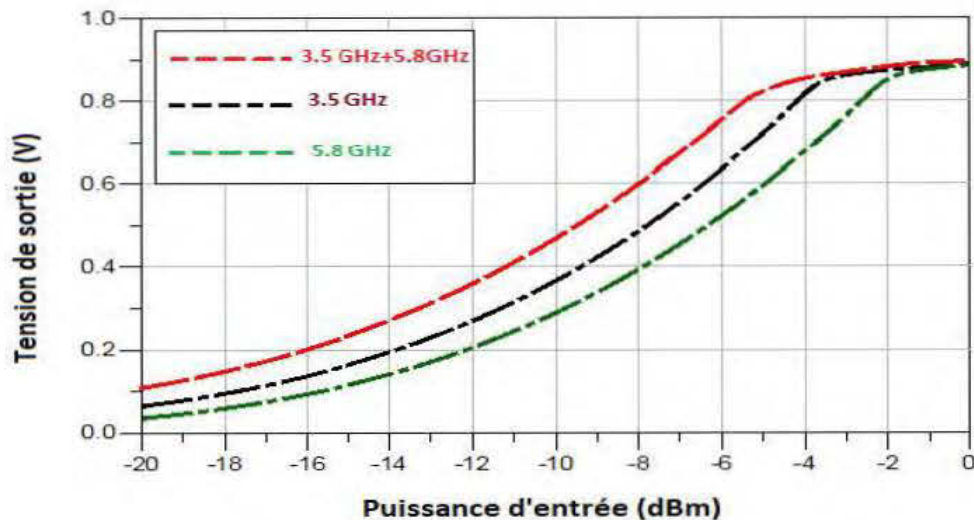


Figure 3. 21: Tension de sortie du redresseur en fonction de la puissance d'entrée.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une antenne à double bande a été conçue et optimisée dans les deux bandes de fréquences 3.5 GHz et 5.8 GHz. La fente en forme U a été gravée sur l'élément rayonnant (patch) pour générer la réponse à double bande. Cette antenne a offert un gain de 10.1 dBi et 8.04 dBi dans les bandes de fréquences 3.5 GHz et 5.8 GHz, respectivement. Pour améliorer davantage le gain de cette antenne, la fente en forme U a été remplacée par une fente optimisée par les algorithmes génétiques dans le but d'avoir un gain maximal dans les deux bandes. Cette antenne a été simulée et fabriquée et les résultats montrent une bonne concordance dans les deux bandes désirées (3.5 et 5.8 GHz) avec un gain élevé de 10.2 dBi dans la première bande et 8.92 dBi dans la deuxième bande. Un redresseur double bandes a été conçu et étudié pour convertir l'énergie radiofréquence absorbée par l'antenne aux fréquences 5.8 GHz et 3.5 GHz en courant continu. Ce redresseur montre une bonne performance, avec une efficacité de conversion de 42 % dans la première bande et 30% dans la deuxième bande. Une tension de sortie de 0.49 V pour une puissance d'entrée de -10 dBm est

observée lorsque le redresseur fonctionne dans les deux bandes montrant l'avantage d'absorption de l'énergie de plusieurs bandes de fréquences.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Plusieurs efforts ont été récemment, déployés pour la récupération de l'énergie RF afin de combler le besoin des batteries pour plusieurs applications. La Rectenna a attiré beaucoup d'attention pour recycler l'énergie ambiante émise par ces systèmes. En conséquence, les travaux présentés dans ce mémoire, s'inscrivent dans le volet de développement de nouvelles Rectennas pour la collecte d'énergie RF pour une densité de puissance d'entrée faible.

Nous avons présenté une Rectenna à gain élevé pour les applications de la récupération d'énergie, constituée d'une antenne micro-ruban à substrat multicouche avec alimentation par couplage fonctionnant à la fréquence 5,8 GHz. Pour améliorer le gain de cette antenne, un FSS a été utilisé, et le gain final de la structure (antenne + FSS) était de 13,1 dBi. Un redresseur destiné à récupérer l'énergie RF de la bande Wi-Fi 5,8 GHz a été conçu avec une seule diode Schottky, servant comme un élément de redressement. Le redresseur présente un bon rendement de conversion de 40% à -3 dBm. Après la conception du Rectenna, nous avons proposé un nouveau réseau hexagonal permettant de récupérer l'énergie à 360 degrés. Cette technique a été utilisée pour la première fois dans les applications de la récupération d'énergie. En utilisant un combineur à courant continu, cette structure a permis de multiplier la tension de sortie du Rectenna par un facteur de 6, permettant ainsi une récupération d'une tension de sortie totale de 5.4 V à -3 dBm.

Dans le même contexte, nous avons proposé un nouveau réseau Rectenna à double bandes pour les applications de récupération d'énergie. La Rectenna proposée consiste en une antenne double-bandes à gain élevé et un redresseur double bandes utilisant la diode Schottky comme élément de redressement. L'antenne proposée est une antenne micro-ruban avec une structure de substrat multicouche avec alimentation couplée, et une fente en U gravée sur le patch pour obtenir la réponse en bande double à 3,5 GHz et 5,8 GHz avec des gains élevés de 10,1 dBi et 8.04, respectivement. Après cela, une

procédure d'optimisation utilisant les algorithmes génétiques est appliquée. Les algorithmes développés ont optimisé la surface couverte par la fente U afin d'obtenir le gain maximal dans les deux fréquences. Les résultats montrent une bonne amélioration, en particulier, dans la deuxième bande, avec un gain maximal de 10,2 dBi dans la première bande et 8,92 dBi dans la deuxième bande. Le redresseur conçu donne des bons résultats, avec une bonne performance d'adaptation dans les deux bandes, et une tension de sortie de 0.49 V à une puissance de -10 dBm. Le système Rectenna proposé pourra être utilisé dans les applications de récupération d'énergie des réseaux capteurs sans fils.

RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE

- [1] V. Kuhn, C. Lahuec, F. Seguin and C. Person, "A Multi-Band Stacked RF Energy Harvester With RF-to-DC Efficiency Up to 84%," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 63, no. 5, pp. 1768-1778, May 2015.
- [2] V. Palazzi et al., "A Novel Ultra-Lightweight Multiband Rectenna on Paper for RF Energy Harvesting in the Next Generation LTE Bands," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 66, no. 1, pp. 366-379, Jan. 2018.
- [3] S. Shen, C. Chiu and R. D. Murch, "A Dual-Port Triple-Band L-Probe Microstrip Patch Rectenna for Ambient RF Energy Harvesting," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 3071-3074, 2017.
- [4] Véronique Kuhn, "Capture opportuniste d'énergie micro-onde pour l'autonomie des objets communicants," thèse de doctorat, Télécom Bretagne, 2015.
- [5] M. Piñuela, P. D. Mitcheson and S. Lucyszyn, "Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 61, no. 7, pp. 2715-2726, July 2013.
- [6] Jingwei Zhang, "RECTENNAS FOR RF WIRELESS ENERGY HARVESTING," thèse de doctorat, University of Liverpool, 2013.
- [7] David Pozar, "Microwave engineering," John Wiley & Sons, 2012.
- [8] U. Olgun, C. C. Chen and J. L. Volakis, "Wireless power harvesting with planar rectennas for 2.45 GHz RFIDs," 2010 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory, Berlin, 2010, pp. 329-331.
- [9] J. O. McSpadden, Lu Fan and Kai Chang, "Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8-GHz rectenna," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, no. 12, pp. 2053-2060, Dec 1998.
- [10] H. Sun, Y. x. Guo, M. He and Z. Zhong, "Design of a High-Efficiency 2.45-GHz Rectenna for Low-Input-Power Energy Harvesting," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 11, pp. 929-932, 2012.
- [11] M. Arrawatia, M. S. Baghini and G. Kumar, "Differential Microstrip Antenna for RF Energy Harvesting," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 4, pp. 1581-1588, April 2015.
- [12] Zhang, Y. Huang and P. Cao, "Wideband rectenna arrays for low input power energy harvesting," IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2013.
- [13] Lee. Chien-Hsing, Chang. Yu-Han, "Design of a broadband circularly polarized rectenna for microwave power transmission," Microwave and Optical Technology Letters, VL 57.

- [14] Hong. Tae-Ui, Oh. Kyoung-Min, Lee. Hyun-Wook, Nam. Hee, Yun. Tae-Soon, Lee. Dae-Sung, Hwang. Hak-In, Lee. Jong-Chul, "Novel broadband rectenna using printed monopole antenna and harmonic-suppressed stub filter," *Microwave and Optical Technology Letters*, VL 52.
- [15] S. Shen, C. Chiu and R. D. Murch, "Multiport Pixel Rectenna for Ambient RF Energy Harvesting," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 2, pp. 644-656, Feb. 2018.
- [16] F. Erkmen, T. S. Almoneef and O. M. Ramahi, "Scalable Electromagnetic Energy Harvesting Using Frequency-Selective Surfaces," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 5, pp. 2433-2441, May 2018.
- [17] Pozar, David M. "A review of aperture coupled microstrip antennas: history, operation, development, and applications." University of Massachusetts at Amherst, (1996).
- [18] T. A. Denidni, L. Talbi, "High gain microstrip antenna design for broadband wireless applications," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2003.
- [19] S. K. Padhi, N. C. Karmakar, C. L. Law and S. Aditya, "A dual polarized aperture coupled circular patch antenna using a C-shaped coupling slot," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 12, pp. 3295-3298, Dec. 2003.
- [20] S. Iyer, C. Cheng, C. Kim and A. Abbaspour-Tamijani, "Compact Gaussian Beam System for S-Parameter Characterization of Planar Structures at Millimeter-Wave Frequencies," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 9, pp. 2437-2444, Sept. 2010.
- [21] F. Xie, G. Yang and W. Geyi, "Optimal Design of an Antenna Array for Energy Harvesting," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 155-158, 2013.
- [22] A. Habani, M. Nedil, T. A. Denidni and L. Talbi, "High gain enhancement off-body antenna for underground mining communications," 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, CA, 2017, pp. 2167-2168.
- [23] X. Zhang and L. Zhu, "High-Gain Circularly Polarized Microstrip Patch Antenna With Loading of Shorting Pins," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 6, pp. 2172-2178, June 2016.
- [24] C. Cheng, H. Huxie and F. H. Su, "A compact high gain patch antenna array for IEEE 802.11ac MIMO application," 2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Kaohsiung, 2016, pp. 327-328.
- [25] X. Y. Zhang, W. Duan and Y. Pan, "High-Gain Filtering Patch Antenna Without Extra Circuit," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 12, pp. 5883-5888, Dec. 2015.

- [26] D. Ferreira, L. Sismeiro, A. Ferreira, R. F. S. Caldeirinha, T. R. Fernandes and I. Cuiñas, "Hybrid FSS and Rectenna Design for Wireless Power Harvesting," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 5, pp. 2038-2042, May 2016.
- [27] M. C. Derbal, A. Zeghdoud and M. Nedil, "A Novel Dual Band Antenna Design for WiFi Applications Using Genetic Algorithms," 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston, MA, 2018, pp. 1009-1010.
- [28] P. Lu, X. Yang, J. Li, and B. Wang, "A dual-frequency quasi-PIFA rectenna with a robust voltage doubler for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 57, no. 2, pp. 319-322, Feb. 2015.
- [29] M. H. Hoang, H. P. Phan, T. Q. Hoang, and T. Vuong, "Efficient compact dual-band antennas for GSM and Wi-Fi energy harvesting," in *Proc. Int. Conf. Adv. Technol. Commun.*, pp. 401404, Feb. 2014.
- [30] X. He, S. Hong, H. Xiong, Q. Zhang and E. M. M. Tentzeris, "Design of a Novel High-Gain Dual-Band Antenna for WLAN Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 798-801, 2009.
- [31] M. Aboulalaa, A. B. Abdel-Rahman, A. Allam, H. Elsadek and R. K. Pokharel, "Design of a Dual-Band Microstrip Antenna With Enhanced Gain for Energy Harvesting Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 1622-1626, 2017.
- [32] A. Collado and A. Georgiadis, "Conformal hybrid solar and electromagnetic (EM) energy harvesting rectenna," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 60, no. 8, p. 10, Aug. 2013.
- [33] A. Nimo, D. Grgic, and L. M. Reindl, "Impedance optimization of wireless electromagnetic energy harvester for maximum output efficiency at uW input power," in *Proc. Active and Passive Smart Struct. Integr. Syst.*, San Diego, CA, USA, 2012, vol. 8341, pp. 83410W1–14.
- [34] C. Mikeka, H. Arai, A. Georgiadis, and A. Collado, "DTV band micropower RF energy-harvesting circuit architecture and performance analysis," in *RFID Technol. Appl.*, 2011, pp. 561–567.
- [35] H. Sun, Y.-X. Guo, M. He, and Z. Zhong, "A dual-band rectenna using broadband yagi antenna array for ambient RF power harvesting," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 918–921, 2013.
- [36] Y. H. Suh and K. Chang, "A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 50, no. 7, pp. 1784–1789, Jul. 2002.
- [37] K. Niotaki et al., "A compact dual-band rectenna using slot-loaded dual band folded dipole antenna," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 1634–1637, 2013.